

MÁSTER UNIVERSITARIO EN

Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en
Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y
TERMOECONÓMICO DE LA INSTALACIÓN
CENTRAL DE LOS EDIFICIOS SOCIALES DE
PORTUGALETE. BÚSQUEDA DE BUENAS
PRÁCTICAS PARA FUTURAS RÉPLICAS***

**Estudiante
Directora
Departamento
Curso académico**

*Irazabal Garcia, Sergio
Picallo Pérez, Ana
Ingeniería Energética
2021/2022*

Bilbao, 2022



ABSTRACT

Given the climate and energy crisis currently affecting the planet and the fact that Spain is one of the most affected countries in the European Union, there is a need for research into energy saving in buildings, with a large part of the focus on reducing their consumption. In this case, the project is located in Greater Bilbao, specifically in Portugalete. The fact that social housing is increasingly in demand is a good reason for research to focus on improving the thermal installations inside these buildings. Even more so, if we take into account that since COVID-19 came into society, more time is spent inside homes, with all that this entails; increased energy demand and consumption, emissions, inflated bills, etc. This project seeks solutions to the irreversibilities that are generated in the systems of the selected dwellings, but the aim is to go beyond the usual energy studies, giving greater importance to the exergetic and thermoeconomic study. First, an analysis will be carried out in which different measures will be taken to define the current state of the installation. Then, the necessary data will be selected to identify the dynamic model of the system. Then, the different operating models will be analysed according to the use. Once all the data has been collected and analysed, an exergetic analysis will be carried out, which will reveal which equipment produces the greatest amount of irreversibilities. All of this, with the aim of finding possible new operating strategies to reduce them and which will give rise to new research in new areas such as the control of installations. In addition, the same facility and each control will be simulated in Seville and Logroño in order to analyse how the costs varies from one climate to another.

Key Words: Heating installations in buildings; operating strategies; control of installations; reduction of consumption



LABURPENA

Gaur egun planetak bizi duen krisi klimatiko eta energetikoa dela eta, eta Espainia Europar Batasuneko herrialde kaltetuenetako bat dela kontuan hartuta, energia-aurrezteko ikertu behar da, eta foku gehienak eraikinen kontsumoaren murrizketan jarri dira. Kasu honetan, Bilbo Handian kokatzen dugu proiektua, Portugaleten hain zuzen ere. Babes Ofizialeko Etxebizitzak gero eta gehiago eskatzen dira, eta hori pisuzko arrazoia da ikerketaren oinarria etxebizitza horiek dituzten instalazio termikoak hobetzea izan dadin. Are gehiago, COVID-19a gizartean sartu denetik denbora gehiago ematen dela etxebizitzan barruan kontuan harturik, horrek dakarren guztiarekin; energia-eskaria eta -kontsumoa handitzea, emisioak, fakturak, etab. Proiektu honek hautatutako etxebizitzan sistematan sortzen diren itzulezintasunei irtenbidea bilatzen die, baina ohiko energia-azterketatik harago iritsi nahi du, azterketa exergetikoari eta termoekonomikoari garrantzi handiagoa emanez. Lehenik eta behin, analisi bat egingo da, eta, bertan, instalazioaren egungo egoera zehazteko hainbat neurri hartuko dira. Ondoren, sistemaren eredu dinamikoa identifikatzeko beharrezko datuak aukeratuko dira. Gero, eredua ezberdinak aztertuko dira, erabileraren arabera. Datu guztiak bildu eta aztertu ondoren, azterketa exergetikoa egingo da, eta horrek erakutsiko ditu itzulezintasun gehiago sortzen dituzten ekipoak. Hori guztia, itzulezintasunak murriztuko dituzten funtzionamendu-estrategia berriak aurkitzeko eta eremu berrietan ikerketa berriak egiteko, hala nola instalazioen kontrolean. Gainera, instalazio bera simulatuko da Sevillako eta Logroñoako kontrolarekin, kostuak klima batetik bestera nola aldatzen diren aztertzeko.

Hitz gakoak: Eraikuntzako instalazio termikoak; funtzionamendu-estrategiak; instalazioen kontrola; kontsumoen murrizketa



RESUMEN

Dada la crisis climática y energética que atraviesa actualmente el planeta y que España es uno de los países de la Unión Europea que más afectado se está viendo, nace la necesidad de investigar en el ahorro energético de los edificios poniendo gran parte de los focos sobre la reducción del consumo de estos. En este caso, situamos el proyecto en el Gran Bilbao, concretamente en Portugalete. El hecho de que las Viviendas de Protección Oficial estén cada vez más solicitadas, es una razón de peso para que la investigación se centre en mejorar las instalaciones térmicas que estas albergan en su interior. Más aún, si tenemos en cuenta que desde que la COVID-19 entro en la sociedad se pasa más tiempo dentro de las viviendas, con todo lo que eso conlleva; aumento de la demanda y el consumo energético, emisiones, facturas infladas, etc. Este proyecto busca soluciones a las irreversibilidades que se generan en los sistemas de las viviendas seleccionadas, pero se quiere llegar más allá de los estudios energéticos habituales, dándole mayor importancia al estudio exergético y termoeconómico. Primero, se realizará un análisis donde se tomarán distintas medidas para definir el estado actual de la instalación. Después, se escogerán los datos necesarios para identificar el modelo dinámico del sistema. Luego, se analizarán los distintos modelos de operación según el uso. Una vez recogidos y analizados todos los datos se procederá al análisis exergético que revelará que equipos producen mayor cantidad de irreversibilidades. Todo ello, con el fin de encontrar posibles nuevas estrategias de funcionamiento que las reduzca y que de pie a nuevas investigaciones en nuevos ámbitos como el control de las instalaciones. Además, se simulará la misma instalación con su respectivo control en Sevilla y en Logroño para analizar cómo varían los costes de un clima a otro.

Palabras Clave: Instalaciones térmicas edificación; estrategias de funcionamiento; control de instalaciones; reducción de consumos



ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| ABSTRACT | 2 |
| LABURPENA | 3 |
| RESUMEN | 4 |
| ÍNDICE | 5 |
| LISTA DE TABLAS | 8 |
| LISTA DE GRÁFICOS | 9 |
| LISTA DE FIGURAS | 9 |
| ACRONIMOS Y SÍMBOLOS | 10 |
| MEMORIA | 13 |
| 1 INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1.1 Introducción a la termoeconomía | 14 |
| 2 CONTEXTO | 15 |
| 4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO | 19 |
| 5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE | 20 |
| 6 ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO | 23 |
| 6.1 Definición de los edificios | 23 |
| 6.2 Definición de la instalación térmica | 24 |
| 6.2.1 CALEFACCIÓN CENTRAL TÉRMICA | 24 |
| 6.2.2 SISTEMA DE PREPARACIÓN DE ACS | 25 |
| 6.2.3 DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE CALEFACCIÓN BLOQUES | 26 |
| 6.2.4 DISTRIBUCIÓN DE ACS A BLOQUES. | 26 |
| 6.2.5 NECESIDADES TÉRMICAS. SELECCIÓN DE GENERADORES | 27 |
| 6.2.6 TIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO Y DESCRIPCIÓN FUNCIONAL. | 27 |
| 6.2.6.1 Motor de cogeneración | 28 |
| 6.2.6.2 Caldera | 28 |
| 6.2.6.3 Circuito de calefacción | 28 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.2.6.4 | Agua caliente sanitaria | 29 |
| 6.2.6.5 | Recuperadores | 29 |
| 6.3 | Análisis energético y exergético de la instalación térmica | 29 |
| 6.3.1 | Balances de energía | 34 |
| 6.3.1.1 | Equipos generadores | 34 |
| 6.3.1.2 | Depósitos de inercia | 34 |
| 6.3.1.3 | Intercambiadores | 35 |
| 6.3.1.4 | Mezcladores | 35 |
| 6.3.1.5 | Divisores | 35 |
| 6.3.1.6 | Consumo de energía | 36 |
| 6.3.1.7 | Producción de energía | 37 |
| 6.3.1.8 | Condiciones ambientales | 38 |
| 6.3.2 | Balances de exergía | 39 |
| 6.3.2.1 | Equipos generadores | 39 |
| 6.3.2.2 | Depósitos de inercia | 39 |
| 6.3.2.3 | Intercambiadores | 40 |
| 6.3.2.4 | Mezcladores | 40 |
| 6.3.2.5 | Divisores | 40 |
| 6.3.2.6 | Consumo de exergía | 41 |
| 6.3.2.7 | Producción de exergía | 42 |
| 6.3.2.8 | Condiciones ambientales | 43 |
| 7 | TERMOCIONOMIA | 43 |
| 7.1 | Estructura Productiva | 44 |
| 7.2 | Costes Exergéticos | 46 |
| 7.3 | Costes exergoeconómicos | 49 |
| 8 | ANÁLISIS CON DISTINTAS CONDICIONES CLIMÁTICAS | 51 |
| 8.1 | Clima cálido. Sevilla | 53 |
| 8.2 | Clima frío. Logroño. | 56 |
| | CONCLUSIONES | 60 |
| 9 | CONCLUSIONES | 60 |
| 9.1 | INSTALACIÓN DE PORTUGALETE | 60 |
| 9.2 | INSTALACIÓN DE SEVILLA Y LOGROÑO | 62 |
| 9.3 | TABLAS DE RESUMEN | 63 |
| 10 | AGRADECIMIENTOS | 64 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 65 |
| | ANEXO I: CÓDIGOS Y ALGORITMOS | 68 |
| | ANEXO I: | 68 |



| | |
|--|-----------|
| ANEXO II: METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO | 79 |
| 12 DESCRIPCIÓN DE TAREAS, FASES, EQUIPOS O PROCEDIMIENTOS | 79 |
| 13 DIAGRAMA DE GANTT/ CRONOGRAMA | 81 |
| ANEXO III: PRESUPUESTO | 82 |
| 14 CONTRATACIÓN DE RR.HH. | 82 |
| 15 GASTOS DE LOCOMOCIÓN | 82 |



LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estructura de las fachadas con orientación norte, este y oeste | 23 |
| Tabla 2. Definición de fuel y producto por equipos | 30 |
| Tabla 3. Resultados del balance de los equipos generadores (acumulado)..... | 34 |
| Tabla 4. Resultados del balance de los depósitos (acumulado)..... | 34 |
| Tabla 5. Resultados del balance de los intercambiadores (acumulado)..... | 35 |
| Tabla 6. Resultados del balance de los mezcladores(acumulado)..... | 35 |
| Tabla 7. Resultados del balance de los divisores (acumulado) | 35 |
| Tabla 8. Resultados del balance de los equipos generadores (acumulado) | 39 |
| Tabla 9. Resultados del balance de los depósitos (acumulado)..... | 39 |
| Tabla 10. Resultados del balance de los intercambiadores (acumulado) | 40 |
| Tabla 11. Resultados del balance de los mezcladores (acumulado) | 40 |
| Tabla 12. Resultados del balance de los divisores (acumulado) | 40 |
| Tabla 13. Nuevos valores de la estructura productiva..... | 45 |
| Tabla 14. Aplicación de la proposición 2..... | 47 |
| Tabla 15. Aplicación de la proposición 4 con dos productos | 47 |
| Tabla 16. Aplicación de la proposición 1 | 48 |
| Tabla 17. Cálculos de costes..... | 48 |
| Tabla 18. Productos totales del sistema | 48 |
| Tabla 19. Costes exergoeconómicos sin contribución solar. CASO 1 | 50 |
| Tabla 20. Costes exergoeconómicos con contribución solar. CASO 2 | 50 |
| Tabla 21. Coste de los productos finales | 51 |
| Tabla 22. Demanda ACS | 51 |
| Tabla 23. Demanda de ventilación | 53 |
| Tabla 24. Rendimientos energéticos en Sevilla..... | 54 |
| Tabla 25. Eficiencia exergética Sevilla..... | 55 |
| Tabla 26. Costes exergéticos por equipos en Sevilla | 55 |
| Tabla 27. Costes exergético de los productos en Sevilla | 55 |
| Tabla 28. Costes exergoeconómicos por equipos en Sevilla..... | 56 |
| Tabla 29. Costes exergoeconómicos de los productos en Sevilla..... | 56 |
| Tabla 30. Eficiencia energética Logroño | 57 |
| Tabla 31. Eficiencia exergética Logroño | 58 |
| Tabla 32. Costes exergéticos por equipos en Logroño | 58 |
| Tabla 33. Costes exergéticos de los productos en Logroño | 58 |
| Tabla 34. Costes exergoeconómicos por equipos en Logroño | 59 |
| Tabla 35. Costes exergoeconómicos de los productos en Logroño..... | 59 |
| Tabla 36. Rendimientos energéticos | 63 |
| Tabla 37. Eficiencias exergéticas | 64 |
| Tabla 38. Costes exergéticos..... | 64 |
| Tabla 39. Costes exergoeconómicos | 64 |
| Tabla 40. Tareas realizadas | 79 |
| Tabla 41. Recuento de horas por tarea, reunión y totales | 80 |



| | |
|--------------------------------------|----|
| Tabla 42. Gastos por RR.HH..... | 82 |
| Tabla 43. Gastos de locomoción | 82 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Consumos por equipos | 36 |
| Gráfico 2. Producción de electricidad | 37 |
| Gráfico 3. Producción de energía térmica..... | 37 |
| Gráfico 4. Condiciones ambientales | 38 |
| Gráfico 5. Consumo por equipos | 41 |
| Gráfico 6. Producción de calor..... | 42 |
| Gráfico 7. Producción de electricidad..... | 43 |
| Gráfico 8. Radiación solar | 43 |
| Gráfico 9. Consumo de energía de los equipos principales en Sevilla..... | 53 |
| Gráfico 10. Consumo de exergía Sevilla | 54 |
| Gráfico 11. Consumo de energía de los equipos principales en Logroño..... | 56 |
| Gráfico 12. Consumo de exergía Logroño | 57 |
| Gráfico 13. Diagrama de Gantt | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Instalación térmica | 24 |
| Ilustración 2. Estructura productiva | 44 |
| Ilustración 3. Estructura productiva simplificada | 44 |



ACRONIMOS Y SÍMBOLOS

| ACRONIMOS | |
|------------------|---|
| ACS | Agua caliente sanitaria |
| AF | Agua fría |
| B | Caldera (Boiler) |
| c | Círculo |
| C | Motor de cogeneración |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| COP | Coeficiente de operación |
| CTE | Código técnico de operación |
| DEP _x | Depósito de inercia |
| D _x | Divisor |
| EERR | Energías renovables |
| ER | Energía residual |
| F | Fuel |
| FER | Fuente de energía renovable |
| HP | Bomba de calor (Heat Pump) |
| HX | Intercambiador de calor |
| INT _x | Intercambiador de calor |
| IPCC | Panel intergubernamental sobre el cambio climático |
| MCP | Modelo de control predictivo |
| M _x | Mezclador |
| nZEB | Nearly zero energy building |
| OMIE | Organizador del mercado ibérico energético |
| ONU | Organización de las naciones unidas |
| P | Producto |
| PV | Instalación fotovoltaica |
| Q _f | Factor de calidad (Quality factor) |
| R | Rombo |
| RITE | Reglamento para las instalaciones térmicas en edificación |
| RR.HH. | Recursos humanos |
| UE | Unión Europea |
| UTA | Unidad de tratamiento de aire |
| VPO | Vivienda de protección oficial |



| SYMBOLS | |
|--------------------|--------------------|
| Subíndice | |
| o | Infinito |
| E | Eléctrico |
| e | Externo |
| ex | Exergético |
| in | Entrante |
| j | Numero de producto |
| out | Saliente |
| s | Superficie |
| Step | Salto |
| T | Térmico |
| t | Instante |
| i | Numero de equipo |
| Superíndice | |
| a | Numeral |
| * | Unitario |



| MATEMÁTICAS Y FÍSICA | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| B [kJ] | Exergía |
| c [€/kWh] | Coste exergoeconómico unitario |
| C [€] | Coste |
| Cp [kJ/KgK] | Calor específico |
| E [kJ] | Energía |
| k [-] | Coste exergético unitario |
| m [kg/s] | Flujo másico |
| Q [kJ] | Transferencia de calor |
| Superficie [m²] | Superficie de estudio |
| T [K] | Temperatura |
| t [h] | Lapso de tiempo |
| UA [W/K] | Coefficiente de transferencia global |
| Vent [l/s] | Caudal de ventilación |
| Vol [l] | Volumen |
| ρ [kg/m³] | Densidad |
| σ [W/m²K] | Constante de Steffan Boltzman |
| b [kJ/kg] | Exergía específica |

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la demanda energética de todos los países del mundo ha aumentado y, en consecuencia, el consumo. Aunque se ha intentado erradicar la dependencia que el ser humano tiene respecto a la energía procedente de fuentes fósiles, se ha comprobado que la transición a un nuevo modelo energético es incompatible con la velocidad a la que crece la actividad humana. Prueba de ello es la crisis que el mercado energético actual está viviendo, que más allá de los conflictos geopolíticos, está viéndose afectada por el agotamiento de las fuentes de energía fósil, producido por su imparable explotación. Pero la desaparición de las reservas fósiles promueve la crisis que preocupa a todos los habitantes: la crisis climática.

De hecho, la Unión Europea (UE) ha declarado el estado de emergencia climática y la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se mantiene firme en la defensa de los 17 objetivos de desarrollo sostenible que presentó de cara al año 2030. Para que estos objetivos se hagan realidad la ONU insiste en la necesidad de aplicar la **“Triple D”**, que básicamente consiste en la *Descarbonización*, *Desmaterialización* y *Digitalización* del sistema.

Hay muchos sectores que se deben de descarbonizar, pero la edificación es un punto clave en este objetivo. Los edificios son lugares donde desarrollamos gran parte de nuestras vidas; en nuestras casas, en supermercados, en restaurantes, oficinas, etc. por ello, es muy importante que se trate de reducir el impacto ambiental de estos tanto en su construcción como durante su uso y demolición. Así lo respaldan *Langevin et. al.* [1], que según uno de sus artículos la aplicación de una eficiencia de construcción masiva junto a la electrificación incentivada y la integración de energía renovable en sus sistemas, puede reducir hasta un 79% las emisiones de CO₂ respecto al año 2005. En este artículo se afirma que la reducción de dichas emisiones está completamente ligada a la calefacción y calentamiento del agua, que, a su vez, se ve influenciada con el uso final de la envolvente en los edificios residenciales.

En los edificios hay tres campos que pueden ayudar reducir emisiones. En primer lugar, tenemos las envolventes, las caras de los edificios que se oponen a todos los factores climáticos con el fin de garantizar un confort térmico en el interior. Las envolventes son aliadas, pero si no se diseñan bien, pueden dar lugar a flujos de pérdidas de calor. Por ello, hoy en día se han empezado a diseñar fachadas activas con sistemas de auto-respuesta. Pero, también se pueden planificar estrategias dependiendo del clima dónde se sitúe el edificio (auto sombreado, auto ventilación, etc.). Ambas opciones pueden llegar a ser capaces de controlar la temperatura del revestimiento para ajustar la transferencia de calor, como es el caso de la adaptación de las fachadas opacas gracias a estrategias basadas en materiales de respuesta automática que se muestra en el artículo *Science Direct* [2]. Trabajo donde se investigan distintas estrategias y medidas de auto respuesta (cambios de reflectancia solar, cambio de conductividad térmica, utilización de materiales termocrómicos, etc.) aplicables a las fachadas.



En segundo lugar, encontraríamos las instalaciones térmicas del edificio, cuyo funcionamiento depende mucho de la calidad de la envolvente. Cuanto más se compenetren entre los dos sistemas menor demanda, consumo y emisiones se generarán. En una vivienda, las instalaciones se diseñan con el fin de cubrir la demanda de Agua Caliente Sanitaria (ACS), calefacción y refrigeración. La imparable crisis climática está llevando a los extremos las investigaciones en torno a los componentes pasivos de los edificios, pero, esto no es suficiente. Si mejorando los elementos pasivos se disminuye la demanda, se debe garantizar que la cantidad de energía que se necesite sea procedente de fuentes renovables, o por lo menos se priorice su uso.

La parte del proceso de la descarbonización de la edificación que se le atribuye a las instalaciones puede tener dos puntos de vista. Por un lado, está el punto de vista individual, donde en un edificio cualquiera y mejora su eficiencia energética. Aunque se le da mucha importancia a la integración de energías renovables, las instalaciones híbridas suelen ser las más elegidas para los edificios de carácter individual. De hecho, en la zona mediterránea de España se están llevando a cabo la descarbonización de los edificios patrimoniales residenciales, donde, las instalaciones híbridas están teniendo el mayor protagonismo. Así lo muestran *R. Caro et. al.* [3] en el estudio que plantean la posibilidad de integrar dentro de un conjunto de mejoras una bomba de calor que alterne Fuentes de Energía Renovable (FER) y electricidad de la red pública para cubrir las necesidades del edificio a tratar.

Por el otro lado, se encuentra el colectivo, donde se diseñan instalaciones a nivel de barrios, comunidades o distritos. Instalaciones que cada vez ofrecen más salidas a los recursos renovables. Este puede ser el caso de estudio del nuevo barrio “*Milano 4 you*” situado en el área urbana de Milán [4]. Una investigación que nace de varios escenarios que tienen como objetivo evitar la energía fósil y que finalmente concluyen en una planta de calefacción urbana que es capaz de integrar diferentes FER; un sistema de cogeneración de biomasa que se acopla a bombas de calor eléctricas y sistemas fotovoltaicos integrados en edificios.

En tercer lugar, es necesario hacer un control continuo de las instalaciones, ya que un funcionamiento óptimo de una instalación conlleva una menor cantidad de pérdidas, mejor aprovechamiento de los recursos, reducción del consumo, menos emisiones, etc. Es tan importante instalar un sistema de control eficiente, que investigadores como *Z. Lee et. al.*, están centrándose en diseñar Modelos de Control Predictivo (MCP) [5]. Ellos plantearon un MCP que básicamente tenía la función de mantener en funcionamiento la instalación en un Coeficiente de Rendimiento (COP) constante y óptimo combinando predicciones meteorológicas y de carga.

1.1 Introducción a la termoeconomía

El control de los sistemas está ganando la importancia que merece a la hora de diseñar las instalaciones y gracias a ello ámbitos como el de la termoeconomía se están dando a conocer en gran parte de las investigaciones. Hasta hace no mucho, la eficiencia de una instalación se podía definir con los recursos, la energía generada, la consumida y la perdida, pero, no era suficiente para contabilizar todas las pérdidas relacionadas con las

irreversibilidades reales del sistema. Las irreversibilidades, son aquellas pérdidas que existen en todo proceso por su naturaleza y que no se pueden aprovechar. Por ello, los análisis exergéticos son muy importantes, ya que ayudan a localizar los puntos o equipos que más irreversibilidades producen y son muy útiles a la hora de intentar reducirlos.

Uno de los objetivos principales de esos análisis debe ser repartir los costes a lo largo de todo el sistema o instalación. De hecho, existen varias publicaciones, como la de *J. M. Sala Lizarraga y Ana Picallo Pérez* [6], que afirman que la termoeconomía es una herramienta útil para el diseño y análisis de nuevos sistemas de energía sostenible o para la optimización de sistemas energéticos complejos según *Adrian Bejan y Eden Mamut* [7]. Más allá de ser una herramienta que ayuda a evaluar los edificios energéticamente, la termoeconomía, es capaz de administrar una explotación sostenible de los recursos necesarios para que funcionen las instalaciones. De hecho, *Wojciech Stanek* [8] proporciona múltiples antecedentes teóricos y ejemplos de la ventaja del uso de análisis de exergía en la gestión de recursos en su libro *Termodinámica para la gestión sostenible de recursos naturales*.

Por lo tanto, la termoeconomía debe de ir ganando cada vez más importancia en el ámbito de las rehabilitaciones si se quiere descarbonizar el sistema y lograr vencer en la lucha de la mitigación del cambio climático.

2 CONTEXTO

La crisis climática no es un tema que haya surgido en la actualidad, es una problemática que lastra al ser humano desde hace más de 20 años, incluso hay quien piensa que se sabe de su existencia antes de que saliera a la luz. Existen artículos como “*Cambio climático mundial: origen y consecuencias*” de *Martha González y E. Jurado* [9], que recogen datos de investigaciones que muestran como la temperatura del planeta aumenta de manera inusual desde finales del siglo XIX, es decir, desde hace más de 100 años.

El impacto humano no ha cesado y el cambio climático ha seguido su curso, como si de un río se tratara; a medida que pasaba el tiempo, se alimenta de otros afluentes, más caudal acumula y más fuerte se convierte. Es por eso que en 1988 la ONU lanza el *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial* y establece el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Este organismo, se encarga de evaluar los diversos aspectos ambientales, donde nacen protocolos como el de Kyoto o París, que obligan a las naciones a redactar nuevas normativas, códigos y decretos en su lucha contra el cambio climático.

La ONU sitúa el cambio climático como problema principal y en 2002 firma el protocolo de Kyoto y en 2015 el acuerdo de París, que obliga a reducir las emisiones a los países industrializados y miembros de UE. En ese contexto, España se centra en los sectores que más consumo de energía suponen para el país. Entonces, en 2003 se redacta el Código Técnico de la Edificación (CTE) que, entre otros, contiene el documento básico que recoge las exigencias de eficiencia energética mínimas que un edificio nuevo o las intervenciones en edificios existentes deben cumplir; con el propósito de reducir la demanda y el consumo energético del sector de la edificación. La última actualización del documento fue en 2019.



Con la intención de apoyar y cumplir el CTE se redacta el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). La última actualización de dicha normativa se aprobó el 24 de marzo de 2021. El RITE establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a abastecer la demanda de confort, calefacción, climatización y ACS de los edificios, con el fin de hacer un uso responsable de la energía. La nueva normativa es un paso adelante para cumplir la meta de descarbonizar el sistema que tiene la UE. Como el CTE, el RITE se aplica en obras nuevas (Nuevos sistemas) y reformas (sustituciones, ampliaciones, cambios de uso de edificios, etc.). La nueva ampliación, conlleva una serie de cambios y modificaciones respecto al anterior RITE:

- 1. Eficiencia energética:** Se quiere fomentar el uso de sistemas que sean eficientes para perder la menor cantidad de energía posible en la generación de frío y calor y en su transporte. Parece ser que la tecnología que mejor se postula para este aspecto es la bomba de calor, principalmente impulsada por la aerotermia.
- 2. Aporte de E.E.R.R. (energías renovables):** Con la ayuda de la prohibición de combustibles fósiles y calderas atmosféricas, se le quiere dar salida a los recursos locales; biomasa, aerotermia, hidrogeno, etc.
- 3. Aprovechamiento de E.R. (energía residual):** En los edificios lo que más destacará será el aprovechamiento de energía residual con recuperadores de calor.
- 4. District heating/Cooling:** Estas instalaciones pasarán a ser definidas según el intercambiador y se deberá de certificar la procedencia renovable de los recursos utilizados.
- 5. Smart Building:** Como se ha comentado con anterioridad, el control tiene mucha importancia a la hora de establecer la demanda y consumo de los edificios. Parece que el gobierno quiere apostar por los Smart Buildings (edificios inteligentes), que son aquellos que están provistos de un control de consumo, automatización y sistemas de gestión integral de la energía. Por ello, las instalaciones que superen 290 kW de potencia útil, deberán de tener sistemas de automatización y control absoluto, siempre y cuando sea técnica y económicamente viable.
- 6. Ampliación del concepto de instalación:** Según la nueva normativa se extenderá hasta las interconexiones urbanas de calefacción y refrigeración y los sistemas de automatización y control.
- 7. Estudios de viabilidad técnica:** Con el fin de acreditar la viabilidad técnica, medioambiental y económica de las alternativas de alta eficiencia, será obligatorio para todos los edificios nuevos desarrollar estudios previos antes de iniciar las obras, cuando en la anterior publicación solamente afectaba a los edificios de más de 1000 m² de superficie.
- 8. Nueva definición de los sistemas de alta eficiencia:** Sistemas de E.E.R.R., cogeneración, redes de calefacción y enfriamiento, sistemas centralizados y bombas de calor; serán los sistemas a los que se les dará prioridad, siempre y cuando sea posible, en caso de no serlo se debe justificar.
- 9. Diseño de condiciones interiores y exteriores:** A partir de la publicación del R.I.T.E., el documento borrará los márgenes de temperaturas y los fijará como límites; 21°C en invierno y 25°C en verano. Lo mismo para las cargas térmicas, donde los percentiles



no superaran el 99% para invierno y el 1% para verano. Así, se conseguirá ajustar la demanda real y reducir la potencia de diseño.

Tanto el CTE como el RITE son documentos que se complementan entre sí para poder cumplir con las nuevas directivas europeas de fomento de FER, eficiencia energética, etc. Se puede plantear un único destino, que sería descarbonizar el sistema, y existe una pieza muy importante que si se utiliza bien puede agilizar el proceso. Esa pieza es el consumo, que tal y como se plantea el futuro es vital que se reduzca. A día de hoy, existen dos razones de peso por las que el consumo de energía de las viviendas debe de ser reducido.

Por un lado, el impacto ambiental y el crecimiento demográfico. Para poder acortar el camino al objetivo (vencer la crisis climática), es necesario que el consumo disminuya y este se convierta en un modelo sostenible y responsable. Además, las emisiones de CO₂ que son las que más influyen en el cambio climático, están directamente conectadas al consumo de las instalaciones (de los edificios). Más allá de los efectos negativos que afectan a los ecosistemas, el incremento de concentración de gases en la atmosfera terrestre da pie a que nuevos organismos (virus, bacterias, etc.) comiencen a circular en torno al ser humano. Nuevos organismos que comenzarán a proliferar utilizando distintos huéspedes, como el ser humano, plantas, animales, hongos, etc. Eso significa que no se verá afectado únicamente el sistema inmunitario del ser humano, también sus hábitos alimenticios, sociales, etc. Se pueden citar estudios que revelan el posible incremento de pacientes con enfermedades respiratorias y el agravamiento de los síntomas que estos producen a causa del aumento de concentración de CO₂ en la atmósfera, como explica *Denise Rauer* [10] en una de sus últimas publicaciones. Pero, la referencia más cercana que se tiene es la crisis producida por la COVID-19, que dos años después de su primer atisbo sigue alterando nuestras vidas y rutinas.

Por el otro lado, las razones económicas y sociales. El último año 2020 sin duda alguna, será recordado por haber sufrido el mayor incremento de los precios de recursos energéticos (gas natural, luz, gasolina, diésel, etc.) que se ha registrado en las décadas pasadas. Los precios se están viendo alterados por conflictos geopolíticos (en Oriente Medio, entre Rusia y UE, etc.) y por la reducción de los derechos de emisión. La UE ha reducido los derechos de emisión de manera tan drástica que también ha tenido que subir sus precios para que las compras de estos se reduzcan. A nivel nacional, la UE pidió a España que retirase el límite superior del precio de la luz que tenía establecido en 180 €/MWh si quería mantenerse en el mercado energético de Europa. España sin alternativas, aprobó la orden de Europa de retirar el límite máximo del coste de la luz que a día 7 de diciembre de 2021 se sitúa en los 211.81 €/MWh, cuando el 9 de enero del mismo año se encontraba sobre 125 €/MWh según el Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE).

Estos factores están consiguiendo que lo que antes eran teorías se conviertan en hechos y la pobreza energética es el caso más claro. Cada vez son más las unidades familiares que deben escoger entre los recursos básicos de alimentación e higiene y el suministro de energía en España y en la UE. Después del impacto generado por la pandemia del virus SARS-COV-2 o COVID19, los casos de pobreza energética han aumentado más aún. En una de sus



investigaciones sobre la eficacia de los planes del gobierno por erradicar la pobreza energética, *David Bienvenido-Huertas* [11] afirmó que antes de la pandemia la pobreza energética ya era un problema de gravedad. Según el trabajo, en Europa el número de personas afectadas ascendía a 124 millones, de los cuales 5.1 millones residían en España (el 22% de los hogares el país).

Por lo tanto, el intento de descarbonización del sistema que propone Europa, conlleva que problemas ambientales, energéticos y sociales como la pobreza energética se solucionen. Todo ello empieza por crear una red de sistemas eficientes que se centren en controlar (modulación) la demanda con todo lo que eso conlleva; Reducción de consumo, de facturas, etc.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

Dada la crisis climática y energética que atraviesa actualmente el planeta y que España es uno de los países de la Unión Europea que más afectado se está viendo, nace la necesidad de investigar en el ahorro energético de los edificios poniendo gran parte de los focos sobre la reducción del consumo de estos. En este caso, situamos el proyecto en el Gran Bilbao, concretamente en Portugalete. El hecho de que las Viviendas de Protección Oficial estén cada vez más solicitadas, es una razón de peso para que la investigación se centre en mejorar las instalaciones térmicas que estas albergan en su interior. Más aún, si tenemos en cuenta que desde que la existencia del COVID-19 la sociedad se pasa más tiempo dentro de las viviendas, con todo lo que eso conlleva; aumento de la demanda y el consumo energético, emisiones, facturas infladas, etc.

Este proyecto busca detectar las irreversibilidades que se generan en los sistemas de las viviendas seleccionadas por medio de intervenciones en el control. Primero, se realizará un análisis donde se tomarán distintas medidas para definir el estado actual de la instalación. Después, se escogerán los datos necesarios para identificar el modelo dinámico del sistema. Luego, se analizarán los distintos modelos de operación según el uso. Una vez recogidos y analizados todos los datos se procederá al análisis exergético que revelará que equipos producen mayor cantidad de irreversibilidades. Todo ello, con el fin de ofrecer nuevas estrategias de funcionamiento que las reduzca. Asimismo, se analizará el modo de funcionamiento de la misma instalación en dos localizaciones con dos climas diversos de España: en Sevilla y Logroño.

La meta de este proyecto es analizar la eficiencia energética de los sistemas de ACS y calefacción del edificio social compuestos por 32 viviendas que hay en Portugalete (País Vasco). La fachada de este, está compuesta por dos elementos activos; un muro solar y un muro trombe. En cuanto a los sistemas, se han instalado, por un lado, elementos renovables; paneles fotovoltaicos y bombas de calor. Por otro lado, un sistema de cogeneración y una caldera convencional de condensación de gas. Esos sistemas se estudiarán energética y exergéticamente, para poder detectar los equipos con mayor cantidad de pérdidas de energía e irreversibilidades. Para localizar esos puntos, después de modelar el sistema de manera dinámica, se realizará un estudio termoeconómico. Analizados todos los equipos, se



pretende proponer un sistema nuevo de control para la instalación, siempre y cuando sea técnica y económicamente viable como establece el nuevo RITE. Al tratarse de un edificio real y social, se dispone de acceso a los datos reales de operación y las mejoras podrán llevarse a cabo de manera práctica y experimental.

Para lograr la meta propuesta, se han establecido varios objetivos, que podrían interpretarse como las diferentes secciones del análisis:

- Primero, se realizará toma, tratamiento y filtrado de datos, con el objetivo de analizar el estado actual de la instalación de calefacción y ACS.
- Una vez filtrada la información que aporta la base de datos, se identificará y verificará el modelo dinámico de la instalación.
- Después, se debe analizar energéticamente los distintos modelos de operación según el uso y las condiciones ambientales.
- En cuarto lugar, se llevará a cabo el análisis exergético de los modos de operación de los sistemas de calefacción y ACS del edificio.
- Se realizará un análisis termoeconómico que concluirá con una propuesta para un mejor control.
- Se analizará el funcionamiento de la instalación en dos zonas climáticas: Sevilla y Logroño.

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Para desarrollar el trabajo es necesario realizar un análisis exergético, que más tarde se representará económicamente aplicando leyes de la Termoeconomía. La termoeconomía es la disciplina que relaciona la física con la economía a través del Segundo Principio de la Termodinámica y tiene como objetivo ayudar a utilizar los recursos materiales de manera eficiente agilizando el consumo de las instalaciones.

Desde el punto de vista termodinámico esta nueva disciplina, ayuda a evaluar la eficiencia de los procesos y equipos individuales para facilitar la localización y cuantificación de las irreversibilidades. Con su punto de vista económico se reflejan los costes de operación que suponen esas irreversibilidades. Por ello, gracias a este análisis se podrá:

- Asignar un precio a los productos en base a criterios físicos.
- Detectar los puntos o procesos donde se producen las irreversibilidades y pérdidas, para su posterior evaluación de costes y propuestas de mejora. Normalmente, esto se lleva a cabo mediante auditorías energéticas.
- Optimizar las variables para minimizar el coste de los productos y ahorrar en recursos, pudiendo realizarse una optimización global (todo un sistema) o local (un solo equipo).
- Detectar las ineficiencias y calcular las pérdidas económicas que estas suponen (diagnóstico termoeconómico)
- Evaluar la viabilidad de las distintas alternativas de diseño o de operación según la localidad de la misma.

Por lo tanto, este trabajo ayudará a optimizar el uso de la instalación basándose en los objetivos genéricos de ahorro energético, reducción de emisiones de CO₂ y consumo y sostenibilidad. Además, puede servir de ejemplo a futuras investigaciones de índole similar.

5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

En la exploración de los problemas que a día de hoy afectan a la sociedad, y buscando una solución que se ajuste a las normativas vigentes, se ha llevado a cabo una investigación previa al proyecto buscando antecedentes de estudios, investigaciones, proyectos, o artículos similares o relacionados, que ayuden a construir una base sólida para desarrollar el presente proyecto. Facilitando así la comprensión de las conclusiones y resultados obtenidos que podrán aportar nuevos conocimientos a futuras investigaciones.

La mayor motivación para realizar este proyecto es ayudar a la mitigación del cambio climático y la crisis energética desde el sector de la construcción, ya que este supone un 40% de las emisiones globales de CO₂ y un 30% del uso de la energía mundial [13]. Además, en España, las instalaciones térmicas son responsables del 70% del consumo total de la energía del país, del cual el 90% es de origen fósil (gas natural y gasóleo en su inmensa mayoría) [14]. A la hora de investigar la mejora de la eficiencia de los edificios, las instalaciones relacionadas con el ACS suelen ser puntos bastante críticos.

Así lo muestran artículos como el de *Michal Zbigniew et. al.* [12], que ofrecen distintas alternativas como calefacción urbana, bomba de calor, recuperadores de calor, etc. Esto es debido a la relevancia que en los últimos años ha tomado la pérdida de energía en los edificios, que los propios autores lo relacionan con el aumento de actividades ligadas al consumo de ACS.

Normalmente las investigaciones que se realizan en torno al ACS de los edificios, vienen acompañadas de estudios en calefacción y climatización. Ejemplo claro de ello es el estudio para *rehabilitación de la residencia de mayores en Burgos* [15]. Como se ha comentado con anterioridad, es muy importante analizar cada uno de los componentes de las instalaciones, ya que por su naturaleza se producen irreversibilidades. Hay dos tipos de irreversibilidades: las evitables y las no-evitables. Las que no se pueden aprovechar son las no-evitables (que son intrínsecas al proceso), pero, las evitables se pueden aprovechar si se interviene en el control o en los equipos. La importancia de este análisis es de tal grado, que cada año se realizan más investigaciones como la de *Alberto Guitián Rodríguez* [16], que, junto a los equipos más voluminosos, analiza las pérdidas producidas en los componentes de fontanería, que a priori, en otros estudios de nivel similar no se tienen en cuenta.

Este tipo de estudios no solo se aplica a viviendas individuales o bloques de viviendas, es más, resulta muy común entre los edificios de carácter público; centros comerciales, polideportivos, etc. Entre los de uso público se pueden mencionar dos. Por un lado, una *Evaluación de un sistema de calefacción por suelo radiante en una capilla restaurada* [17] que se llevó a cabo en enero de 2021 y cuyo objetivo era lograr la eficiencia térmica manteniendo el equilibrio entre el confort térmico y la conservación del patrimonio. Aprovechando la

instalación existente se hizo un análisis de la situación previa y se procedió a mejorarla. Por el otro lado, estaría la rehabilitación de la instalación de calefacción y refrigeración para un edificio monumental como es el Teatro Real de Monnaie, en Bruselas [18]. Proyecto que puede servir de inspiración a la hora de redactar las alternativas, ya que muestra todas las etapas de la rehabilitación de los sistemas implicados.

Como adelantaba el RITE, es muy importante que las intervenciones que se lleven a cabo sean técnica y económicamente viables. Así lo respalda, el *Análisis económico y financiero de soluciones de rehabilitación para una institución educativa* [19], que más allá del análisis termotécnico hace gran hincapié en los costos que supone la explotación de las instalaciones térmicas del centro educativo analizado.

Existen asimismo análisis vanguardistas que llegan hasta los edificios históricos como las iglesias. Es el caso de *Florin-Emilian Turcanu et. al.* [20], que después de realizar el análisis energético de una iglesia, mejoran varios sistemas (calefacción entre ellos) y después realizan un estudio económico de la propia mejora. Por ello, este trabajo quiere dedicar unas pinceladas al análisis termoeconómico, ya que a veces el detectar las irreversibilidades puede ahorrar nuevas inversiones (equipos caros), siempre y cuando se preparen estrategias que neutralicen el consumo.

Como la termoeconomía, el análisis exergético ocupa un hueco en este proyecto, ya que numerosos estudios reflejan la importancia de estos a la hora de intentar mejorar la eficiencia energética de las instalaciones [21] [22] [23]. En el intento de incorporar nuevas unidades de calor en una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), *Rasool Kalbasi et. al.* [24] compararon las irreversibilidades antes y después de la modificación. Los cálculos de las ecuaciones de equilibrio exergético, demostraron que las irreversibilidades totales se redujeron en un 23,17 % y la eficiencia energética mejoró un 15,85 %.

Según estudios de encuestas, se han llevado más análisis exergéticos en instalaciones muy parecidas a las que se quieren analizar; sistemas de refrigeración [25], bombas de calor [26], etc. De hecho, *Hu et. al.* [27] comprobaron los efectos diferentes de estrategias que se aplicaban en bombas de calor desde el punto de vista de la primera y segunda ley de la termodinámica, donde la mejor estrategia y por lo tanto la elegida, fue la que reducía las irreversibilidades y el consumo.

Aunque estos análisis, también se han llevado a cabo en edificios grandes como el que examinaron *Sayadi et al.* [28]. Este edificio contaba con una eficiencia muy baja, del 4% aproximadamente y se demostró que la mayor cantidad de pérdidas se producían en los sistemas de conversión (%54 del total), lo que una vez más, demuestra la importancia de analizar las irreversibilidades equipo a equipo. Al igual que el estudio de *Caliskan et. al.* [29] que propusieron el cambio de la rueda desecante de un sistema de refrigeración tras mostrar que esta era responsable del casi 43% de irreversibilidades totales del sistema. El nuevo sistema de refrigeración estaría compuesto por un enfriador evaporativo, una rueda de calor sensible y la rueda desecante, que disminuían gran parte de las pérdidas.

Todo ello sin dejar a un lado el control de las instalaciones. En 2019 *Saeed Sayadi et. al.* [30] llevaron a cabo estrategias de control basadas en la exergía. *Rezmara y col.* [31]

mostraron la reducción del 22% de exergía destruida y el ahorro de 36% en el consumo utilizando un algoritmo MPC. También *Reedy et. al.* [32] propuso un modelo MPC de exergía para aumentar la eficiencia de los edificios utilizando una combinación de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Pero, el control no solo es una estrategia para agilizar el consumo y generar ahorros energéticos y económicos, pues, así lo demostraron *Trinklein y col.* [33], diseñando un MPC basado en la exergía para gestionar los sistemas de energía de los buques navales. Este, tenía como objetivo reducir el impacto ambiental producido en el sector de la navegación; reduciendo las irreversibilidades generadas en la propulsión y calefacción del buque.

Este no es el primer proyecto que conlleva un análisis exergoeconómico a nivel mundial. Ya en 2016, en la Universidad Técnica de Yildiz (Turquía); *Ugur Akbulut y col.* [34] realizaron una valoración exergoambiental y exergoeconómica de un sistema de calefacción de pared junto a una bomba de calor. Estudio que mejoró por completo la eficiencia exergética y energética del sistema y, sobre todo, de los paneles del sistema de calefacción.

A nivel europeo, también se están aplicando análisis de las instalaciones térmicas en las rehabilitaciones de los edificios unifamiliares, aunque a veces llevan un segundo objetivo entre manos. Es el caso de Portugal, cuyo sector del parque de viviendas correspondiente a los edificios más antiguos se está degradando a gran velocidad. En un intento de frenar el abandono de las casas, en ciudades como la de Covilha se realizaron análisis energéticos y térmicos en algunos edificios antiguos. Una de los aspectos más vigilados en la instalación fue la calefacción central de 22 kW/h de potencia que había instalada [35].

En España, los últimos años, desde el punto de vista de la edificación se ha vivido un intento de transición hacia los edificios nearly zero energy Building (nZEB), que es el término anglosajón para referirse a los edificios de consumo nulo o cercano a cero. En este intento, propuestas como la de *Mónica Calero et. al.* [36] dejan al descubierto la gran importancia de los sistemas térmicos a la hora de lograr un edificio NZEB. En ese estudio, tras una larga investigación del clima y los recursos renovables disponibles en la provincia de Granada, se propuso cambiar el modelo energético de la instalación anterior a uno que fuese impulsado por biocombustibles, mostrando su eficacia frente al anterior.

Para finalizar, no existen referencias de proyectos anteriores a este, que estudien la eficiencia energética de las instalaciones térmicas en edificios de viviendas de protección oficial en Portugalete. Aun así, esta no sería la primera propuesta de estudio y análisis energético que se lleva a cabo en el País Vasco. En 2018, *Andrea Murguía Vallejo*, redactó la rehabilitación de las instalaciones térmicas de una vivienda unifamiliar [37] situada en el municipio vizcaíno de Bakio, el cual incluía una investigación de las instalaciones previas y un estudio con las mejoras que podían hacer posible la integración de energías renovables y la reducción del consumo de recursos naturales.

6 ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

El próximo apartado describe la instalación que se va a estudiar. Para ello se definirán los edificios, las instalaciones térmicas y los modelos energéticos que se emplearán para su estudio. Esta información se ha obtenido de la memoria técnica del proyecto de construcción.

6.1 Definición de los edificios

Las instalaciones pertenecen al conjunto de edificios situado en lo alto de la calle Juan de la cosa del municipio de Portugalete, en el Gran Bilbao, Bizkaia. Se trata de tres edificios contiguos y cada uno dispone de cinco plantas, dos viviendas por planta y dos áreas subterráneas.

Las viviendas situadas en estos edificios se consideran viviendas de protección oficial (VPO), ya que, forman parte del programa de la vivienda social del Gobierno Vasco. Este programa tiene como objetivo facilitar viviendas a bajo precio a familias y personas que no disponen de los suficientes ingresos para poder pagar los gastos de una vivienda a día de hoy.

Para que los gastos fuesen aun menores, los edificios fueron diseñados para tener una demanda de calefacción muy baja. Aun así, el problema que existe a día de hoy, es que los ocupantes de las viviendas no pueden pagar otros gastos relacionados con el consumo energético. Por ello, los edificios disponen de ciertos sistemas para reducir la demanda energética total:

- Sistemas pasivos, energías renovables y cogeneración.
- Una de las fachadas de uno de los tres edificios tiene un muro Trombe, orientado al sur y conectado al sistema de ventilación por medio de un recuperador de calor.
- Otro edificio tiene una pared solar conectada al sistema de calefacción, que proporciona aire caliente a la bomba de calor situada en el techo.
- El resto de las fachadas tienen la estructura que se muestra en la Tabla 1.
- Un total de 22,4 kW instalados gracias a los 88 paneles fotovoltaicos que hay colocados en el techo. Estos tienen la función de alimentar la bomba de calor y los ascensores de los edificios.

Tabla 1. Estructura de las fachadas con orientación norte, este y oeste

| COMPOSICIÓN DE LA FACHADA | ELEMENTO | CARACTERÍSTICAS | TRANSMITANCIAS TÉRMICAS ($\frac{W}{m^2K}$) |
|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|
| ELEMENTOS OPACOS | Panel sándwich | | 0,26 |
| | Poliuretano | | |
| | Lana de roca | | |
| | Hormigón celular | | |
| | Yeso | | |
| HUECOS | Ventanas | Vidrio de baja emisividad 6/12/4 | 2,2 |
| TECHO | Poliestireno extruido | | 0,3 |

6.2 Definición de la instalación térmica

La instalación térmica a estudiar está compuesta por suelo radiante y grifería para el reparto de ACS para todas las viviendas que componen los tres bloques. La instalación central se ubica en una de las dos parcelas soterradas que existen en el conjunto de bloques. El calor es generado por un motor de cogeneración, una bomba de calor impulsada por aerotermia y una caldera de condensación de gas natural. Los equipos auxiliares, acumulación y control de la instalación se encuentran en la misma parcela que los equipos principales (Ilustración 1).

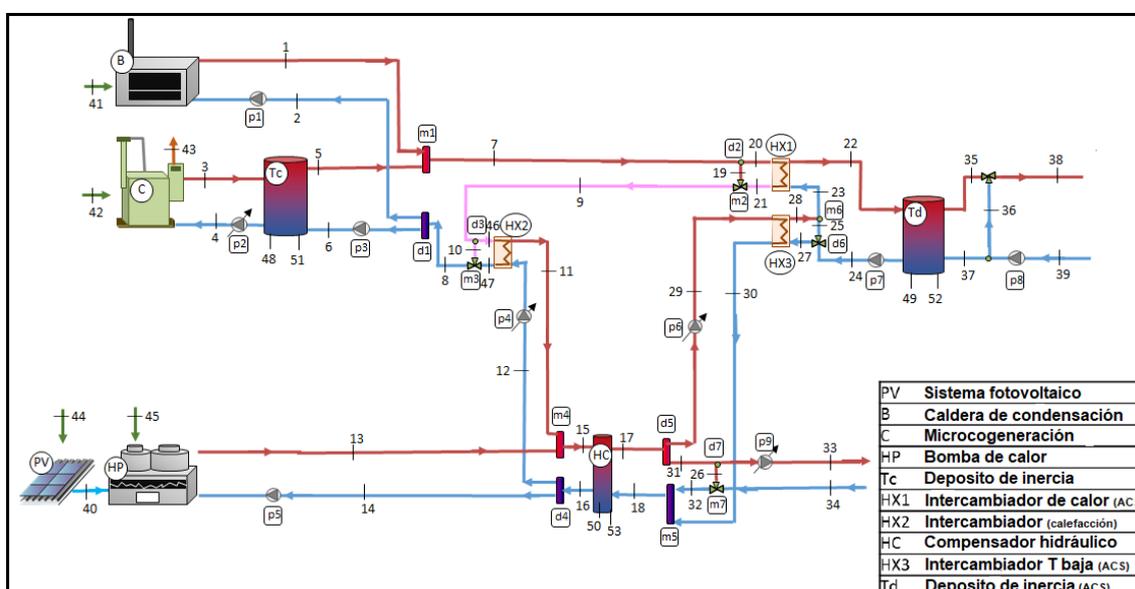


Ilustración 1. Instalación térmica

6.2.1 CALEFACCIÓN CENTRAL TÉRMICA

Por cuestiones de eficiencia, se dispone de una calefacción central y no de una individual por cada vivienda. El motor de cogeneración es capaz de alcanzar 12,5 kWt de potencia nominal y se alimenta a base de gas natural, ya que, en el País Vasco la red de gas natural se encuentra muy accesible en la gran mayoría de localidades. La microcogeneración instalada tiene como objetivo cubrir la demanda base de los edificios. Para ello consta de los siguientes equipos auxiliares:

- Dos acumuladores de 2000 litros de capacidad.
- Una bomba (P₂) para garantizar el correcto almacenamiento del agua que optimiza el almacenamiento del agua manteniéndola a 80°C. Aun así, se necesita una diferencia de temperaturas suficiente para poder producir ACS.



- Una válvula automática con doble vía que se abre en cuanto el motor de cogeneración empieza a funcionar. Si el sistema de cogeneración se para por una reducción de carga en la calefacción, el sistema analógico de control hará que la válvula se cierre, aislando así el depósito de acumulación y el motor.
- Una segunda bomba (P3) posibilita la circulación del agua por los colectores principales del sistema. Esta es necesaria para mantener a 80°C el acumulador, la microcogeneración estará en marcha hasta que la temperatura de retorno al depósito sea de 70°C.
- Como los depósitos de acumulación funcionan contra la temperatura del compensador (Tc), cuando esta baja de 80°C una válvula abre el circuito para que otra bomba haga circular el agua caliente desde el tanque. En caso de que la cogeneración no sea capaz de suministrar la suficiente temperatura, la válvula se abrirá para que la bomba (P1) haga circular el agua que viene desde la caldera hasta los colectores principales del sistema.
- No en todas las épocas del año existen altas demandas de agua a alta temperatura. Es por eso que el sistema contiene una válvula de carácter divisor a la salida de una de las bombas para mezclar el agua de retorno con la de acumulación hasta que la mezcla alcance una temperatura adecuada antes de entrar en los circuitos secundarios, entre 50°C y 55°C.

El sistema de control ajusta la producción de calor a baja o alta temperatura, basándose únicamente en la demanda existente de agua de alta temperatura. El funcionamiento del motor de cogeneración suministra 12,5 kW_t y 5,5 kW_E de potencia, por ello, se trata de maximizar el número de horas que esté en funcionamiento priorizando su activación respecto los demás equipos.

6.2.2 SISTEMA DE PREPARACIÓN DE ACS

El agua caliente producida a 80 °C se dirige a los intercambiadores correspondientes para la generación de ACS. Como en todas las instalaciones de ACS, se debe garantizar la salida del agua 60 °C, por lo tanto, esa será la temperatura de referencia del depósito de acumulación.

Como en el equipo anterior, existe una válvula, en este caso de tres vías, que hace posible la mezcla del agua caliente que se impulsa y la que retorna al sistema de producción de ACS. Esta válvula se regula según la consigna de temperatura que haya en la zona alta del acumulador. Gracias a este sistema se puede regular la producción a la demanda existente en cada momento, es decir, si no fuese necesario se regularía la cesión de energía al acumulador para que esta no se desperdicie y funcione con más facilidad. El agua proveniente de la red (AF) se regula mediante otra válvula.

Una sonda se encarga de medir la temperatura del ACS enviada a las distintas plantas de la instalación. Pero, para ajustar esa temperatura se usa otra válvula de 3 vías, la cual mezcla el AF y el ACS.

Con el fin de prevenir la proliferación de la Legionela, se fijará la temperatura inferior del tanque de ACS en 70°C. Hay tres bombas que se encargan de recircular el agua que vuelve al acumulador de ACS. Para conseguir mantener el agua caliente a 60°C se ajusta el caudal,



arranque y detención de las bombas del circuito primario y secundario de ACS, sin tener en cuenta la demanda existente en cada momento.

6.2.3 DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE CALEFACCIÓN BLOQUES

El agua caliente enviado al colector de impulsión, se distribuye por circuitos independientes. Como se ha mencionado anteriormente, existe una instalación de suelo radiante para abastecer la demanda de calefacción y la temperatura necesaria que deben suministrar esos circuitos para el funcionamiento correcto de la instalación será de 45 °C.

Cada uno de los circuitos está provisto de una bomba que dirigirá el fluido a sus respectivos bloques. Las bombas son de frecuencia variable y pueden regular el flujo másico que las atraviesa según la demanda. Por lo tanto, dependiendo de las exigencias, el sistema de control ordenará a la bomba variar su diferencial de presión o mantenerlo constante. Además, tienen una válvula de tres vías que mezclan los flujos de salida y de retorno. Gracias a esas válvulas el sistema es capaz de mantener la temperatura de abastecimiento, aunque se esté generando agua caliente a alta temperatura.

Cada uno de los circuitos de cada vivienda, dispone de derivaciones para la impulsión y retorno del agua caliente que están directamente conectadas al sistema de reparto de este. En la rama de impulsión hay instalada una válvula de dos vías que se regula según la demanda de calefacción de cada vivienda.

Atendiendo a la normativa DIN 2440, el material del que se componen los tubos es acero. Para los tramos horizontales está recubierto con fibra de vidrio y revestido con chapa de aluminio. Los tramos verticales con fibra de vidrio y recubiertos con aluminio. En el interior de sala se emplean los espesores especificados en la IT 1.2.4.2.1.2 del RITE. Las tuberías de los colectores del suelo radiante del interior de las viviendas están compuestas por polietileno reticulado por multicapas.

6.2.4 DISTRIBUCIÓN DE ACS A BLOQUES.

Como ocurre con la calefacción, para el ACS cada bloque tiene su circuito de distribución independiente. La válvula de tres vías se ajusta en función de la temperatura que se registre en el ACS antes de proceder a su distribución. Por lo tanto, si fuese necesario esta daría paso al AF procedente de la red. Es decir, la temperatura de distribución se mantiene gracias al correcto funcionamiento de la válvula.

En el caso del ACS, también existen derivaciones de impulsión y retorno para conectar el circuito de distribución de cada bloque. Cada sistema de distribución consta de circuitos de recirculación que se conectan con la vivienda más alejada desde el punto en el que se sitúan. De tal forma que en caso que la temperatura de distribución del punto más alejado sea inferior a 50°C, se activará la bomba (de frecuencia no variable) que moverá el flujo por dicho circuito.

El material empleado en la distribución general es el polipropileno y en la individual se usa el polietileno reticulado por multicapa y bien aislado térmicamente, pues así consta en el RITE.

6.2.5 NECESIDADES TÉRMICAS. SELECCIÓN DE GENERADORES

Según la memoria técnica, para diseñar la instalación se tuvo en cuenta el pico de demanda que debía cubrirse, calculando la demanda de calefacción por un lado y la de ACS por el otro.

Para calcular la calefacción bastó con sumar las cargas térmicas producidas por la transmisión de calor a través de la envolvente de los bloques. Además, se sumó el impacto de la ventilación necesaria planteando una recuperación con una eficiencia del 50%, rondado los 84 kW. Por lo tanto, entre el motor de cogeneración, la bomba de calor y la caldera de gas natural las necesidades de calefacción quedan cubiertas con bastante margen.

En el caso del ACS la potencia a cubrir se estima de unos 75 kW, sin considerar la coincidencia en la simultaneidad a plena carga de la demanda de calefacción y ACS. Además, como el sistema es bastante grande en cuanto a tamaño, conserva una gran inercia térmica que al estar trabajando en suelo radiante existe la necesidad de vencer al arrancarse el sistema de calefacción. Teniendo en cuenta los aspectos que representan ambas demandas se decidió diseñar la central con los siguientes equipos:

- Un motor de cogeneración que suministra 12,5 kW térmicos y 5,5 kW eléctricos. Se considera que trabaja a alta temperatura.
- La bomba de calor impulsada por aerotermia trabaja a baja temperatura y es capaz de producir 12,9 kW de potencia.
- Por último, un sistema de apoyo que consiste en una caldera de condensación de gas natural de 102 kW de potencia.

Es importante conocer el orden de prioridad de funcionamiento que tiene la instalación. El equipo que tiene mayor prioridad es el motor de cogeneración ya que desde el punto de vista de la eficiencia energética así se requiere. Después, si la demanda de calefacción aumenta se dará paso a la bomba de calor. Por último y solo en caso de que los equipos anteriores no sean capaces de cubrir la demanda de calefacción y ACS, se activa la caldera de condensación.

6.2.6 TIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO Y DESCRIPCIÓN FUNCIONAL.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la instalación, se dispone de un sistema de control para cada tipo de demanda, uno para la calefacción y otro para el ACS. El control se gestiona por controladores Trend con entradas y salidas donde se conectan con los distintos equipos de la instalación. Estos, están unidos mediante red Ethernet (Internet por cable) a un controlador maestro servidor de Web Trend.

Para la instalación de ACS el control activa primero el motor de cogeneración hasta que el depósito alcanza y mantiene los 80°C. Después arranca la bomba de calor ya que en ese momento se puede usar la producción de calor a baja temperatura (45°C). En caso de que no sea posible cubrir la demanda de ACS total, la bomba pasa a trabajar en alta temperatura (70°C). En caso de no ser suficiente con ambos sistemas, se procede a conectar la caldera de condensación.

La demanda de calefacción se dispara según el calendario (1 de noviembre al 15 de mayo) y a la temperatura ambiente en el exterior. Si la temperatura ambiente es menor a 17 °C y hay un mínimo de 5 viviendas demandando calefacción según marcan sus termostatos individuales se pondrá en marcha el sistema hasta alcanzar los 21 °C.

La bomba de calor cubre la demanda de calefacción principalmente, pero, si se diese el caso de que la bomba de calor no pudiese afrontar la demanda, esta pasa a trabajar en alta temperatura. Para ello se regula la válvula del tercer intercambiador (HX3), facilitando así, que el motor de cogeneración y la caldera soporten la demanda.

En el caso de que la energía proveniente del sistema fotovoltaico y el motor de cogeneración sea suficiente, la bomba se activará si:

- La temperatura media del edificio en el interior es inferior a 21 °C
- Existan mínimo 5 viviendas por debajo de la consigna de temperatura.

Si se llega a cumplir una de las condiciones, la calefacción por suelo radiante se pondrá en marcha de forma “gratuita” para todas las viviendas que se sitúen por debajo de 21 °C, dando pie a que el edificio se caliente en segundo plano. En el instante en el que se supere la consigna de temperatura o se termine el tiempo de suministro “gratuito” se pone fin al abastecimiento “gratuito”. Para describir con mayor detalle el sistema de control de la instalación, se procede a analizar los equipos más relevantes en el control.

6.2.6.1 Motor de cogeneración

El motor se controla mediante las señales que lanzan las sondas de temperatura situadas en los depósitos de inercia y retorno de flujo. Como es un control autónomo, se accionan las válvulas de dos vías de aislamiento de los equipos; teniendo una única señal de control desde el sistema de marcha-parada como referencia para poder detenerlo a distancia.

6.2.6.2 Caldera

Se tiene la posibilidad de generar temperatura baja y alta, por lo tanto, la caldera tendrá un sistema de control que cuando la demanda de ACS se dispare mande actuar en alta Tª y otra, para actuar en Tª baja para cuando solo exista demanda de calefacción.

6.2.6.3 Circuito de calefacción

Además de controlar el sistema es capaz de calcular la demanda necesaria en cada instante en función de la temperatura ambiente exterior. Por lo tanto, será el encargado de calcular las bombas de los circuitos primarios de manera que se dé el servicio de calefacción. También puede darse el caso que se ponga en marcha para protegerse contra el hielo cuando haya temperaturas muy bajas. La función anti-icing estará disponible cuando la instalación se encuentre fuera de horario de funcionamiento y la temperatura exterior sea inferior a 5 °C por debajo del absoluto.

Cuando las temperaturas superen los valores fijados, se cortará el funcionamiento debido a la temperatura exterior. El valor recomendado son 15 °C, pero dentro del sistema de control se pueden programar distintas consignas de temperaturas y se pueden seleccionar diferentes horarios de funcionamiento.

Para controlar el caudal de los tres circuitos secundarios, se debe de actuar sobre la variación de velocidad de las bombas colocadas en disposición paralelo, manteniendo constante el gradiente de presión de cada circuito.

6.2.6.4 Agua caliente sanitaria

Como con la calefacción, el sistema más allá de controlar, puede hacer un cálculo de la demanda de ACS en cada momento. Para ello, se basa en las temperaturas de los acumuladores y la consigna de temperatura a la que se quiere mantener el agua. El sistema acciona las bombas del circuito ACS, que son las que mantienen el flujo en movimiento. Las bombas primarias tendrán un funcionamiento intensivo, mientras que las secundarias solo se encenderán en caso de que la temperatura del tanque baje de 55 °C y se detendrá si supera los 62 °C. Las secundarias se ponen en marcha si la temperatura del colector de baja temperatura es 2 °C superior a la entrada del intercambiador de ACS y la bomba de calor (HX2).

6.2.6.5 Recuperadores

Existen 3 recuperadores (uno por bloque) y tienen la función de recuperar el calor de las viviendas que ventilan. Cada uno tiene su propio control; por ejemplo, en el edificio número 3 hay un muro trombe que regula su ventilación mediante la apertura y cierre de sus distintas compuertas. En caso de que la compuerta del muro hacia el recuperador esté cerrada y la temperatura del muro sea muy alta, la compuerta de alivio se abrirá para disipar el exceso de temperatura. Por lo tanto, dependiendo de la fachada instalada, habrá un sistema de control distinto.

6.3 Análisis energético y exergético de la instalación térmica

En este apartado se realizarán dos estudios uno energético y otro exergético con el fin de analizar cómo se comporta la instalación en ambos aspectos. Para ambos casos, se ha utilizado la disposición de estados de la Ilustración 1. Después de modelar la instalación en *Trnsys*, se ha simulado con intervalos de 0,25 horas (15 minutos) y una vez obtenidos los datos de cada estado se han llevado a cabo las distintas gráficas y balances con Excel. En total se han simulado un total de 1000 horas, correspondientes al intervalo de calefacción de un año tipo.

Para realizar los balances se han definido los *Fueles* y *Productos* de cada equipo tal y como se muestra en la **Tabla 2**. Para distinguir los balances, a los flujos energéticos se les asigna la letra E y a los exergéticos la B.

Por un lado, se consideran *fuel* aquellos flujos de energía o exergía que alimenten el equipo a estudiar. Por el otro lado, serán *productos* los resultados útiles que se obtienen después de transformar el *fuel*. Por lo tanto, la relación entre ambos dará a conocer cuál es el rendimiento energético y cuál es rendimiento exergético del equipo que se está analizando.

Siempre que se habla de rendimiento es porque existe una parte del fuel que no se aprovecha. En el caso de los flujos energéticos se denominan pérdidas energéticas y en el

caso de las exergías de flujo, irreversibilidades. Las irreversibilidades son equivalentes al sumatorio de la destrucción de exergía y pérdidas exergéticas que se da en el sistema.

Tabla 2. Definición de fuel y producto por equipos

| EQUIPO | FUEL | PRODUCTO | RENDIMIENTO |
|--------------------------------|--|--|--|
| <p>Caldera (B)</p> | E_{41} B_{41} | $E_1 - E_2$ $B_1 - B_2$ | $\frac{E_1 - E_2}{E_{41}}$ $\frac{B_1 - B_2}{B_{41}}$ |
| <p>Motor Cogeneración (C)</p> | E_{42} B_{42} | $(E_3 - E_4) + E_{43}$ $(B_3 - B_4) + B_{43}$ | $\frac{(E_3 - E_4) + E_{43}}{E_{42}}$ $\frac{(B_3 - B_4) + B_{43}}{B_{42}}$ |
| <p>Panel Fotovoltaico (PV)</p> | E_{44} B_{44} | $E_{40} + E_{54}$ $B_{40} + B_{54}$ | $\frac{E_{40} + E_{54}}{E_{44}}$ $\frac{B_{40} + B_{54}}{B_{44}}$ |
| <p>Bomba de Calor (HP)</p> | $E_{40} + E_{45}$ $B_{40} + B_{45}$ | $E_{13} - E_{14}$ $B_{13} - B_{14}$ | $\frac{E_{13} - E_{14}}{E_{40} + E_{45}}$ $\frac{B_{13} - B_{14}}{B_{40} + B_{45}}$ |
| <p>Depósito Tc</p> | $(E_3 - E_4) + ETc^{DESCARGA}$ $(B_3 - B_4) + BTc^{DESCARGA}$ | $E_5 - E_6$ $B_5 - B_6$ | $\frac{E_5 - E_6}{(E_3 - E_4) + ETc^{DESCARGA}}$ $\frac{B_5 - B_6}{(B_3 - B_4) + BTc^{DESCARGA}}$ |

| EQUIPO | FUEL | PRODUCTO | RENDIMIENTO |
|-------------------------------|--|--|--|
| <p>Depósito Hc</p> | $(E_{15} - E_{16}) + EHC^{DESCARGA}$ $(B_{15} - B_{16}) + BHC^{DESCARGA}$ | $E_{17} - E_{18}$ $B_{17} - B_{18}$ | $\frac{E_{17} - E_{18}}{(E_{15} - E_{16}) + EHC^{DESCARGA}}$ $\frac{B_{17} - B_{18}}{(B_{15} - B_{16}) + BHC^{DESCARGA}}$ |
| <p>Depósito Td</p> | $(E_{22} - E_{24}) + EHC^{DESCARGA}$ $(B_{22} - B_{24}) + BHC^{DESCARGA}$ | $E_{35} - E_{37}$ $B_{35} - B_{37}$ | $\frac{E_{35} - E_{37}}{(E_{22} - E_{24}) + EHC^{DESCARGA}}$ $\frac{B_{35} - B_{37}}{(B_{22} - B_{24}) + BHC^{DESCARGA}}$ |
| <p>Intercambiador 1 (HX1)</p> | $E_{20} - E_{21}$ $B_{20} - B_{21}$ | $E_{22} - E_{23}$ $B_{22} - B_{23}$ | $\frac{E_{22} - E_{23}}{E_{20} - E_{21}}$ $\frac{B_{22} - B_{23}}{B_{20} - B_{21}}$ |
| <p>Intercambiador 2 (HX2)</p> | $E_{46} - E_{47}$ $B_{46} - B_{47}$ | $E_{11} - E_{12}$ $B_{11} - B_{12}$ | $\frac{E_{11} - E_{12}}{E_{46} - E_{47}}$ $\frac{B_{11} - B_{12}}{B_{46} - B_{47}}$ |
| <p>Intercambiador 3 (HX3)</p> | $E_{29} - E_{30}$ $B_{29} - B_{30}$ | $E_{28} - E_{27}$ $B_{28} - B_{27}$ | $\frac{E_{28} - E_{27}}{E_{29} - E_{30}}$ $\frac{B_{28} - B_{27}}{B_{29} - B_{30}}$ |

| | EQUIPO | FUEL | PRODUCTO | RENDIMIENTO |
|----|--------|--|----------------------|--|
| m1 | | $E_1 + E_5$ $B_1 + B_5$ | E_7 B_7 | $\frac{E_7}{E_1 + E_5}$ $\frac{B_7}{B_1 + B_5}$ |
| m2 | | $E_{19} + E_{21}$ $B_{19} + B_{21}$ | E_9 B_9 | $\frac{E_9}{E_{19} + E_{21}}$ $\frac{B_9}{B_{19} + B_{21}}$ |
| m3 | | $E_{10} + E_{47}$ $B_{10} + B_{47}$ | E_8 B_8 | $\frac{E_8}{E_{10} + E_{47}}$ $\frac{B_8}{B_{10} + B_{47}}$ |
| m4 | | $E_{11} + E_{13}$ $B_{11} + B_{13}$ | E_{15} B_{15} | $\frac{E_{15}}{E_{11} + E_{13}}$ $\frac{B_{15}}{B_{11} + B_{13}}$ |
| m5 | | $E_{30} + E_{32}$ $B_{30} + B_{32}$ | E_{18} B_{18} | $\frac{E_{18}}{E_{30} + E_{32}}$ $\frac{B_{18}}{B_{30} + B_{32}}$ |
| m6 | | $E_{28} + E_{25}$ $B_{28} + B_{25}$ | E_{23} B_{23} | $\frac{E_{23}}{E_{28} + E_{25}}$ $\frac{B_{23}}{B_{28} + B_{25}}$ |
| m7 | | $E_{26} + E_{34}$ $B_{26} + B_{34}$ | E_{32} B_{32} | $\frac{E_{32}}{E_{26} + E_{34}}$ $\frac{B_{32}}{B_{26} + B_{34}}$ |

| EQUIPO | FUEL | PRODUCTO | RENDIMIENTO |
|-----------|--------------------------|--|--|
| <p>d1</p> | E_8 B_8 | $E_2 + E_6$ $B_2 + B_6$ | $\frac{E_2 + E_6}{E_8}$ $\frac{B_2 + B_6}{B_8}$ |
| <p>d2</p> | E_7 B_7 | $E_{20} + E_{19}$ $B_{20} + B_{19}$ | $\frac{E_{20} + E_{19}}{E_7}$ $\frac{B_{20} + B_{19}}{B_7}$ |
| <p>d3</p> | E_9 B_9 | $E_{10} + E_{46}$ $B_{10} + B_{46}$ | $\frac{E_{10} + E_{46}}{E_9}$ $\frac{B_{10} + B_{46}}{B_9}$ |
| <p>d4</p> | E_{16} B_{16} | $E_{12} + E_{14}$ $B_{12} + B_{14}$ | $\frac{E_{12} + E_{14}}{E_{16}}$ $\frac{B_{12} + B_{14}}{B_{16}}$ |
| <p>d5</p> | E_{17} B_{17} | $E_{31} + E_{29}$ $B_{31} + B_{29}$ | $\frac{E_{31} + E_{29}}{E_{17}}$ $\frac{B_{31} + B_{29}}{B_{17}}$ |
| <p>d6</p> | E_{24} B_{24} | $E_{25} + E_{27}$ $B_{25} + B_{27}$ | $\frac{E_{25} + E_{27}}{E_{24}}$ $\frac{B_{25} + B_{27}}{B_{24}}$ |
| <p>d7</p> | E_{31} B_{31} | $E_{33} + E_{26}$ $B_{33} + B_{26}$ | $\frac{E_{33} + E_{26}}{E_{31}}$ $\frac{B_{33} + B_{26}}{B_{31}}$ |

6.3.1 Balances de energía

En esta sección se expondrán los resultados de los balances energéticos de cada equipo y las gráficas correspondientes al consumo y producción de energía del sistema.

6.3.1.1 Equipos generadores

Para los equipos generadores; caldera, sistema fotovoltaico, motor de cogeneración y bomba de calor, se ha realizado el balance habiendo calculado la energía en cada punto. En el caso de la bomba de calor su eficiencia se mide por el coeficiente de operación (COP) y los sistemas productores de electricidad llevan asociado el cálculo del rendimiento eléctrico.

Tabla 3. Resultados del balance de los equipos generadores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ] | Producto [MJ] | Pérdidas [MJ] | COP [-] | Rendimiento eléctrico [%] | Rendimiento térmico [%] |
|---------|-----------|---------------|---------------|---------|---------------------------|-------------------------|
| Caldera | 3522,65 | 3401,73 | 120,91 | | | 96,57 |
| Motor C | 62474,97 | 59237,40 | 3237,57 | | 27 | 67,82 |
| PV | 62950,30 | 7554,03 | 55396,26 | | 12 | |
| BC | 3043,55 | 4230,96 | | 1,39 | | |

$$Energia [kJ] = m \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot t_{step} [h] \cdot Cp \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \cdot T [K] \quad (1)$$

6.3.1.2 Depósitos de inercia

Para los depósitos de inercia o acumuladores, se debe considerar la influencia que tienen los flujos de carga o de descarga. Existen dos opciones; la primera considera la descarga del depósito como si fuese un *fuel*. La segunda considera la carga como un producto. Para este estudio se opta por la primera opción, por lo tanto, se ha sumado la carga al resto de *fuel*es que tienen los acumuladores.

Tabla 4. Resultados del balance de los depósitos (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ] | Producto [MJ] | Pérdidas [MJ] | Rendimiento térmico [%] |
|--------|-----------|---------------|---------------|-------------------------|
| DEP TC | 45003,71 | 40677,70 | 4326,02 | 90,38 |
| DEP HC | 31109,60 | 25814,51 | 5295,09 | 82,97 |
| DEP TD | 29417,51 | 24958,27 | 4459,24 | 84,84 |

$$ET_c^{DESCARGA} [kJ] = Vol [l] \cdot \rho \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot Cp \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \cdot (T_{t-1} - T_t) [K] \quad (2)$$

$$ET_c^{CARGA} [kJ] = Vol [l] \cdot \rho \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot Cp \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \cdot (T_t - T_{t-1}) [K] \quad (3)$$

6.3.1.3 Intercambiadores

En los intercambiadores se han aplicado los mismos principios que para los generadores y los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del balance de los intercambiadores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ] | Producto [MJ] | Pérdidas [MJ] | Rendimiento térmico [%] |
|--------|-----------|---------------|---------------|-------------------------|
| INT 1 | 28287,52 | 28273,76 | 13,75 | 99,95 |
| INT 2 | 15780,66 | 15767,97 | 12,68 | 99,91 |
| INT 3 | 6561,21 | 6556,27 | 4,93 | 99,92 |

6.3.1.4 Mezcladores

Los mezcladores son los encargados de unir dos flujos distintos, como puede ser la unión de dos flujos fríos o dos flujos calientes. Al tratarse de componentes con aislamiento solo se pierde una parte insignificante de energía en forma de calor. Por eso en la Tabla 6 todos los rendimientos superan el 99%.

Tabla 6. Resultados del balance de los mezcladores(acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ] | Producto [MJ] | Pérdidas [MJ] | Rendimiento térmico [%] |
|--------|-----------|---------------|---------------|-------------------------|
| m1 | 179100,29 | 179097,25 | 3,04 | 99,99 |
| m2 | 150807,16 | 150797,19 | 9,97 | 99,99 |
| m3 | 135030,93 | 135022,28 | 8,64 | 99,99 |
| m4 | 145403,70 | 145399,33 | 4,36 | 99,99 |
| m5 | 990183,34 | 990158,90 | 24,43 | 99,99 |
| m6 | 367228,14 | 367222,90 | 5,23 | 99,99 |
| m7 | 459950,95 | 459921,09 | 29,86 | 99,99 |

6.3.1.5 Divisores

Aunque el proceso de los divisores sea el contrario, muestran rendimientos similares.

Tabla 7. Resultados del balance de los divisores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ] | Producto [MJ] | Pérdidas [MJ] | Rendimiento térmico [%] |
|--------|------------|---------------|--------------------|-------------------------|
| d1 | 135022,28 | 135020,86 | 1,42 | 99,99 |
| d2 | 179097,25 | 179094,69 | 2,55 | 99,99 |
| d3 | 150798,91 | 150797,19 | 1,71 | 99,99 |
| d4 | 125405,71 | 125392,06 | 13,64 | 99,98 |
| d5 | 1015973,41 | 1015970,55 | 2,86 | 99,99 |
| d6 | 373784,42 | 373779,06 | 5,35 | 99,99 |
| d7 | 492269,51 | 492269,51 | 6×10^{-5} | 100 |

6.3.1.6 Consumo de energía

A continuación, se grafican los datos. En primer lugar, el Gráfico 1, muestra el consumo de energía por equipos. Como se puede observar la cogeneración marca una línea de tendencia horizontal, por lo tanto, se corrobora que la instalación prioriza la puesta en marcha del motor de cogeneración sobre las otras. Este no se detiene en exceso y cuando lo hace será por motivos de mantenimiento o imprevistos.

También se aprecia que cuando el equipo de cogeneración no es capaz de mantener la temperatura del depósito de ACS, la bomba de calor y la caldera entran en acción. Entre las 1350 horas y las 1750 horas se aprecia un valle donde los consumos de la caldera y bomba de calor caen hasta un valor nulo. Seguramente se trate de un periodo donde la demanda cayó y la cogeneración fue capaz de abastecerla por completo.

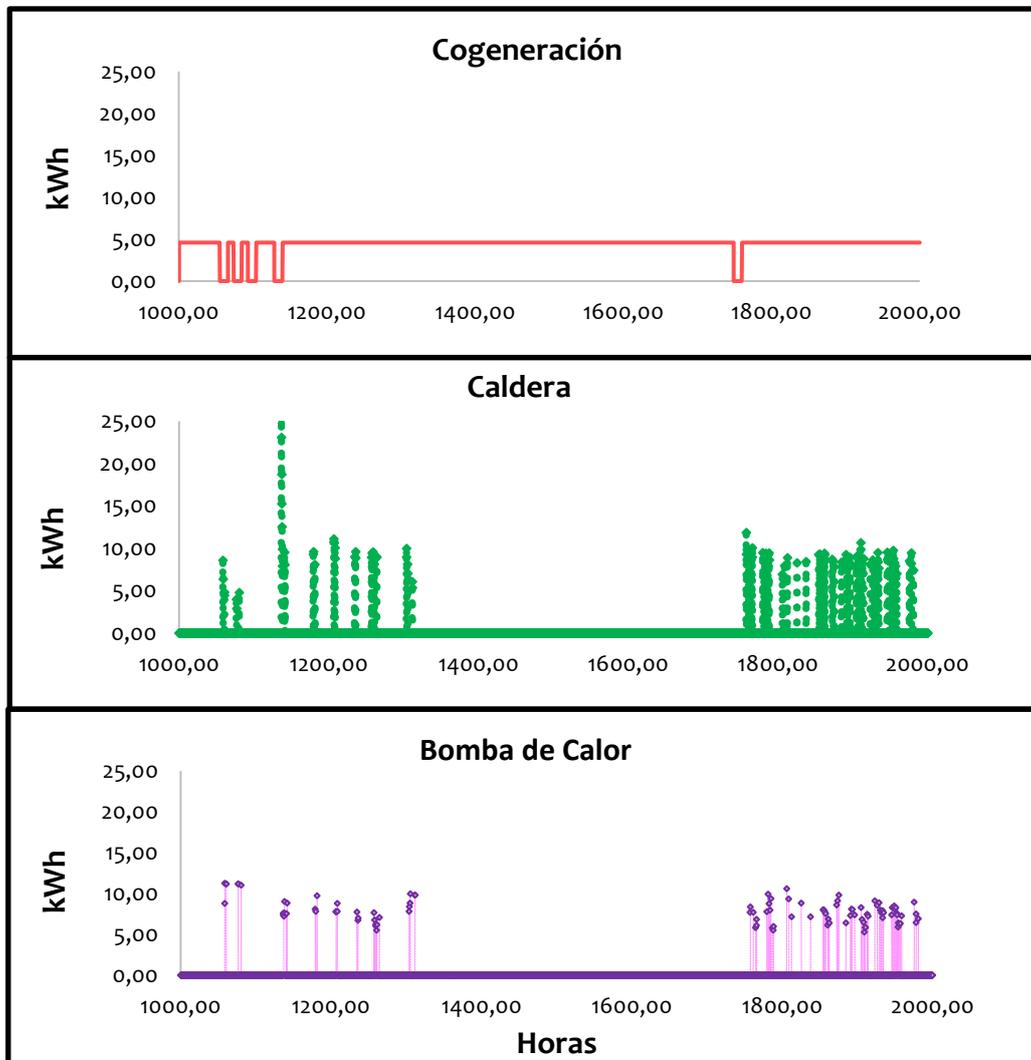


Gráfico 1. Consumos por equipos

6.3.1.7 Producción de energía

La producción de energía se ha dividido en dos ramas. Por un lado, se ha estudiado la generación de energía eléctrica (Gráfico 2). En el caso del motor de cogeneración la producción es constante, ya que esta, depende de que el motor esté en funcionamiento o no. Por la tanto, será una réplica del consumo del equipo de cogeneración. En cambio, la producción por parte de los paneles fotovoltaicos, depende mucho de la radiación solar, por ello las curvas describen formas similares (Gráfico 4).

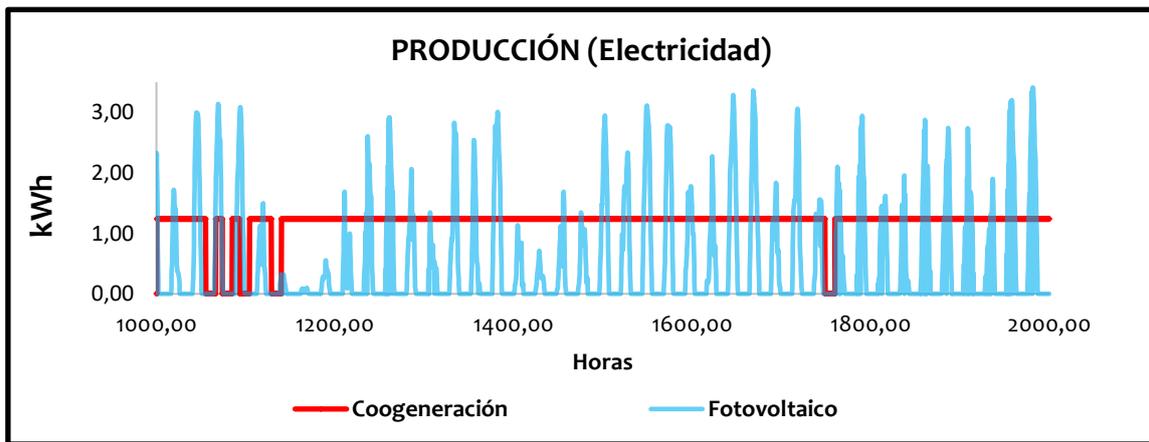


Gráfico 2. Producción de electricidad

Por otro lado, la generación de calor (Gráfico 3), donde se observa que la producción de ACS es más constante que la de calefacción. Esto es básicamente, porque la demanda de ACS es prácticamente la misma a diario, mientras que la de calefacción varía según la temperatura ambiente y las necesidades térmicas de la vivienda.

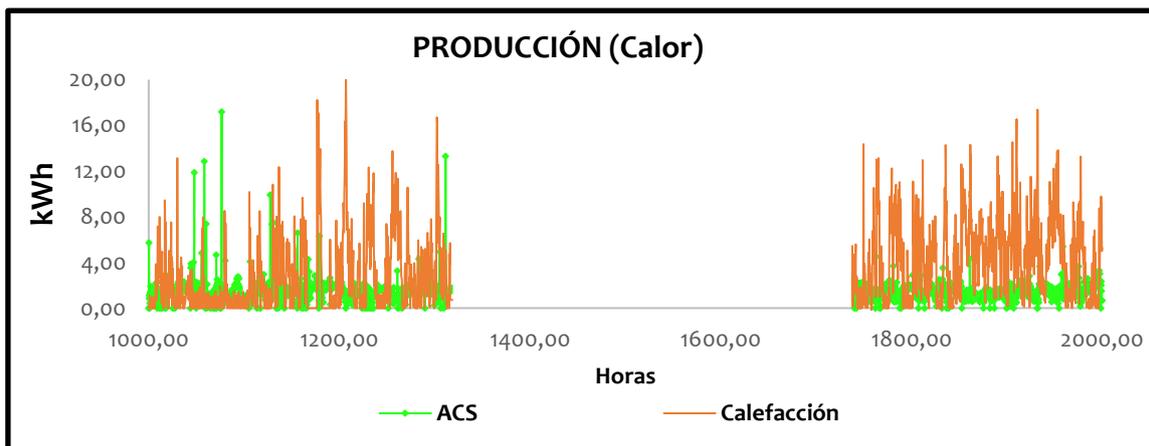


Gráfico 3. Producción de energía térmica

6.3.1.8 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales que más afectan al sistema de producción son la radiación solar y la temperatura ambiente. Cuanto menor radiación hay mayor consumo de red tendrá la bomba de calor, ya que el sistema fotovoltaico no será capaz de alimentar la bomba de calor en solitario. Cuanto mayor sea la temperatura, menor será la demanda de calefacción, habrá que producir menos calor y en consecuencia se reducirá el consumo.

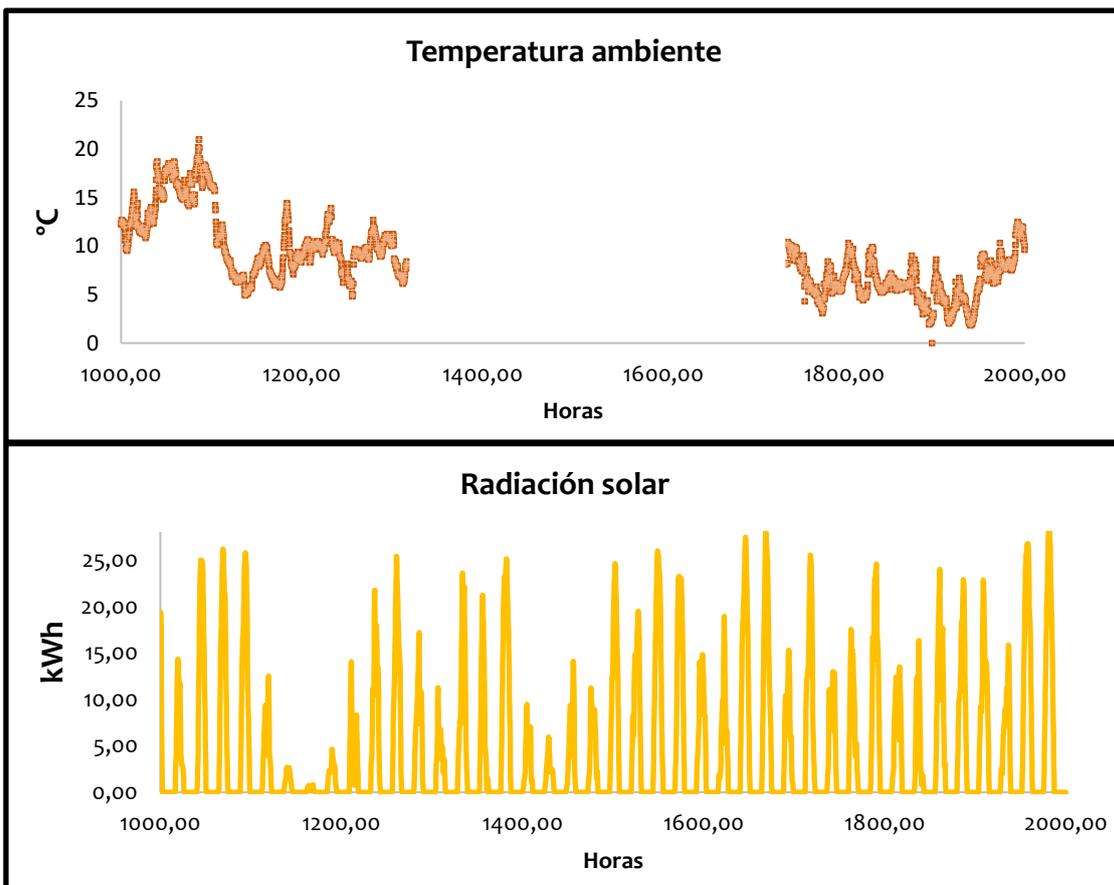


Gráfico 4. Condiciones ambientales

6.3.2 Balances de exergía

En esta sección se expondrán los resultados de los balances de cada equipo y las gráficas correspondientes a la exergía.

6.3.2.1 Equipos generadores

Para los equipos generadores, se tendrá en cuenta que las exergías relacionadas con los flujos de electricidad tienen el mismo valor que para la energía, pero, para los flujos de calor será necesario calcular las exergías por cada punto. En el caso de los recursos externos, como el combustible en la caldera, se debe de aplicar el factor de calidad (Q_f) del fuel, que para el gas natural es 1.04.

Tabla 8. Resultados del balance de los equipos generadores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ _{ex}] | Producto [MJ _{ex}] | Irreversibilidades [MJ _{ex}] | Eficiencia [%] | Eficiencia eléctrica [%] | Eficiencia térmica [%] |
|---------|--------------------------|------------------------------|--|----------------|--------------------------|------------------------|
| Caldera | 3663,55 | 573,84 | 3089,70 | | | 15,66 |
| Motor C | 64973,97 | 23930,20 | 41043,77 | | 25,96 | 10,87 |
| PV | 63129,13 | 7554,03 | 55575,09 | | 11,9 | |
| BC | 3360,82 | 433,21 | 2927,60 | 12,89 | | |

$$B_{electricidad} [kJ] = E_{electricidad} [kJ] \quad (4)$$

$$B_{gas\ natural} [kJ] = E_{gas\ natural} [kJ] \cdot Q_f [-] = E_{gas\ natural} \cdot 1,04 \quad (5)$$

$$B_i [kJ] = \Delta t [h] \cdot \dot{m} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot c_p \left[\frac{kJ}{kg\ K} \right] \cdot \left[(T_i - T_0) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_i}{T_0} \right) \right] [K] \quad (6)$$

$$B_{solar} [kW] = \sigma \left[\frac{W}{m^2\ K} \right] \cdot A [m^2] \cdot T_s^4 \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_0}{T_s} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right] [K] \quad (7)$$

6.3.2.2 Depósitos de inercia

Se debe aplicar el mismo criterio seguido para el balance energético, pero con las fórmulas correspondientes a la exergía.

Tabla 9. Resultados del balance de los depósitos (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ _{ex}] | Producto [MJ _{ex}] | Irreversibilidades [MJ _{ex}] | Eficiencia térmica [%] |
|--------|--------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| DEP TC | 9180,21 | 6739,56 | 2440,64 | 73,41 |
| DEP HC | 3125,18 | 2626,96 | 498,22 | 84,06 |
| DEP TD | 4184,45 | 3629,88 | 554,56 | 86,75 |

$$BTc^{DESCARGA} [kJ] = Vol [l] \cdot \rho \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot C_p \left[\frac{kJ}{kg\ K} \right] \cdot \left[(T_{t-1} - T_t) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{t-1}}{T_t} \right) \right] [K] \quad (8)$$

$$BTc^{CARGA} [kJ] = Vol [l] \cdot \rho \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot C_p \left[\frac{kJ}{kg\ K} \right] \cdot \left[(T_t - T_{t-1}) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_t}{T_{t-1}} \right) \right] [K] \quad (9)$$

6.3.2.3 Intercambiadores

La eficiencia de los intercambiadores disminuye bastante en comparación al rendimiento energético anteriormente calculado.

Tabla 10. Resultados del balance de los intercambiadores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ _{ex}] | Producto [MJ _{ex}] | Irreversibilidades [MJ _{ex}] | Eficiencia térmica [%] |
|--------|--------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| INT 1 | 5007,24 | 4191,323,28 | 815,91 | 83,71 |
| INT 2 | 2286,09 | 1985,07 | 301,02 | 86,83 |
| INT 3 | 756,60 | 459,69 | 296,90 | 60,76 |

6.3.2.4 Mezcladores

En los mezcladores se juntan flujos a diferente temperatura lo que hace que la exergía se destruya. Si se mezclaran a la misma temperatura, no habría irreversibilidades asociadas con la mezcla.

Tabla 11. Resultados del balance de los mezcladores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ _{ex}] | Producto [MJ _{ex}] | Irreversibilidades [MJ _{ex}] | Eficiencia térmica [%] |
|--------|--------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| m1 | 16331,42 | 16314,78 | 16,64 | 99,90 |
| m2 | 11306,67 | 11305,41 | 1,25 | 99,99 |
| m3 | 9019,26 | 9018,19 | 1,06 | 99,99 |
| m4 | 10121,40 | 10110,21 | 11,18 | 99,89 |
| m5 | 62680,62 | 62330,05 | 350,56 | 99,44 |
| m6 | 23679,86 | 23609,87 | 69,99 | 99,70 |
| m7 | 29124,04 | 29108,72 | 15,32 | 99,95 |

6.3.2.5 Divisores

Tabla 12. Resultados del balance de los divisores (acumulado)

| Equipo | Fuel [MJ _{ex}] | Producto [MJ _{ex}] | Pérdidas [MJ _{ex}] | Eficiencia térmica [%] |
|--------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| d1 | 9018,19 | 9018,00 | 0,19 | 100,00 |
| d2 | 16314,78 | 16313,91 | 0,87 | 99,99 |
| d3 | 11305,41 | 11305,35 | 0,05 | 100,00 |
| d4 | 7704,35 | 7703,11 | 1,23 | 99,98 |
| d5 | 64957,02 | 64953,60 | 3,41 | 99,99 |
| d6 | 24435,99 | 24432,06 | 3,93 | 99,98 |
| d7 | 31856,75 | 31856,75 | 0 | 100,00 |

6.3.2.6 Consumo de exergía

Los consumos relacionados con el gas natural, disponen de una exergía con valor superior a su propia energía. Así se muestra en el Gráfico 5, donde, para los principales equipos consumidores de gas natural; el motor de cogeneración y la caldera los valores de la curva son ligeramente mayores. En cambio, el consumo de la bomba de calor se mantiene constante, ya que el valor energético y exergético de los flujos eléctricos son equivalentes. Por lo tanto, aquellos equipos que se alimentan de gas natural, mostrarán una eficiencia exergética menor, debido al aumento de su *fuel* en términos exergéticos y a la baja calidad que supone un flujo térmico de calor respecto a la calidad del combustible.

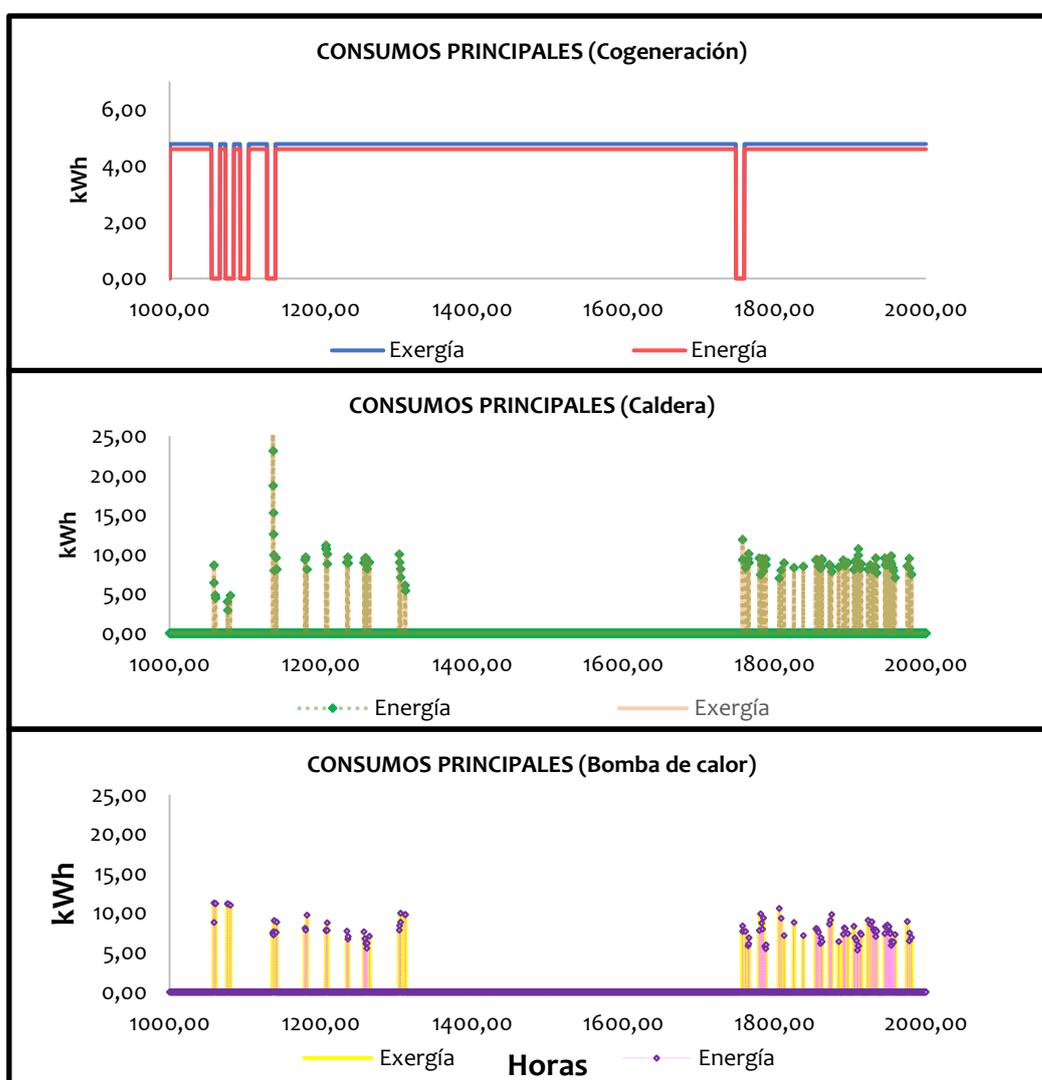


Gráfico 5. Consumo por equipos

6.3.2.7 Producción de exergía

Con la producción de calor sucede exactamente lo mismo: la calidad de un flujo térmico es muy baja. Es decir, la exergía es notablemente menor que la energía del flujo debido a su baja capacidad de producir trabajo útil. Por eso las curvas de producción de exergía de ACS y calefacción están tan distanciadas de las correspondientes a la energía. En cambio, la producción de electricidad se mantiene igual tanto para la solar fotovoltaica como para la cogeneración.

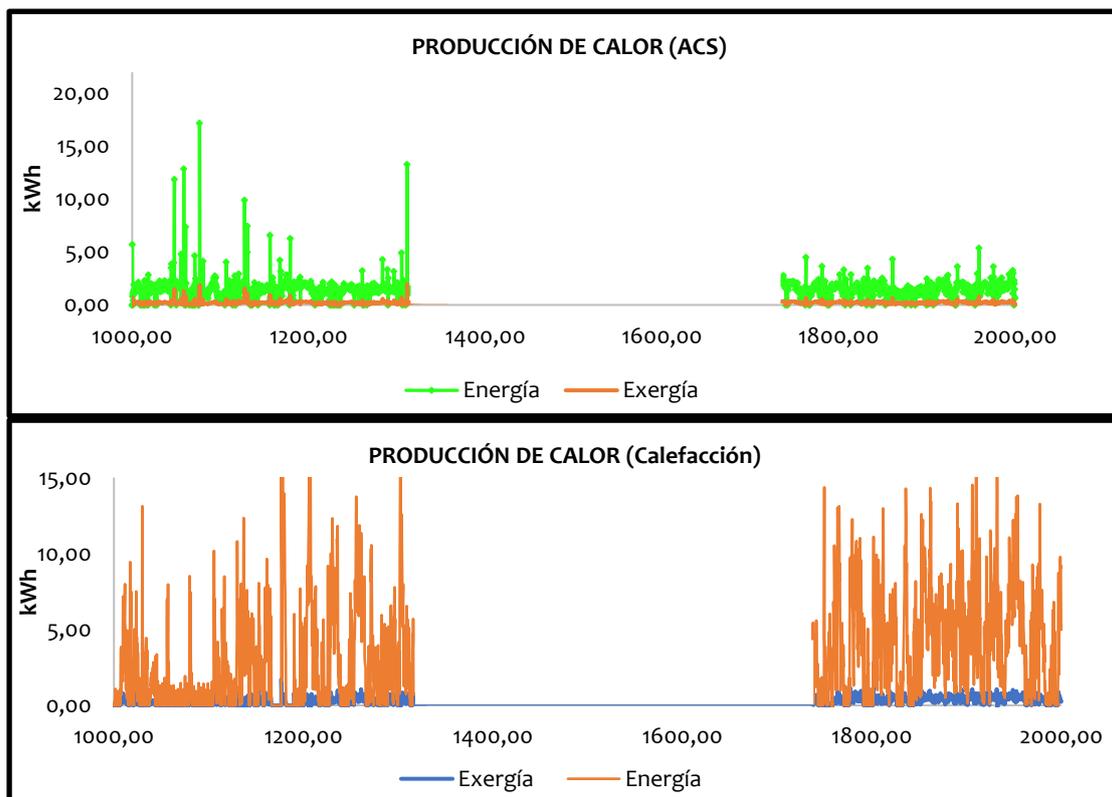


Gráfico 6. Producción de calor

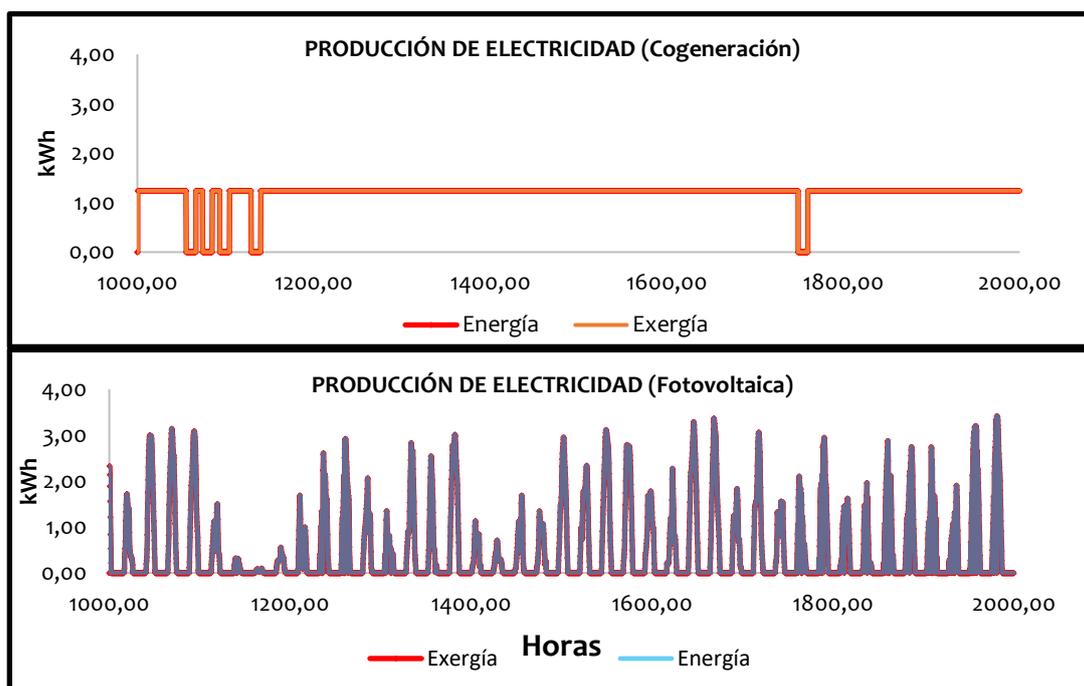


Gráfico 7. Producción de electricidad

6.3.2.8 Condiciones ambientales

En cuanto a la radiación solar, aunque no se aprecie muy bien, la exergía disponible esta ligeramente por encima de la energía asociada a la radiación solar.

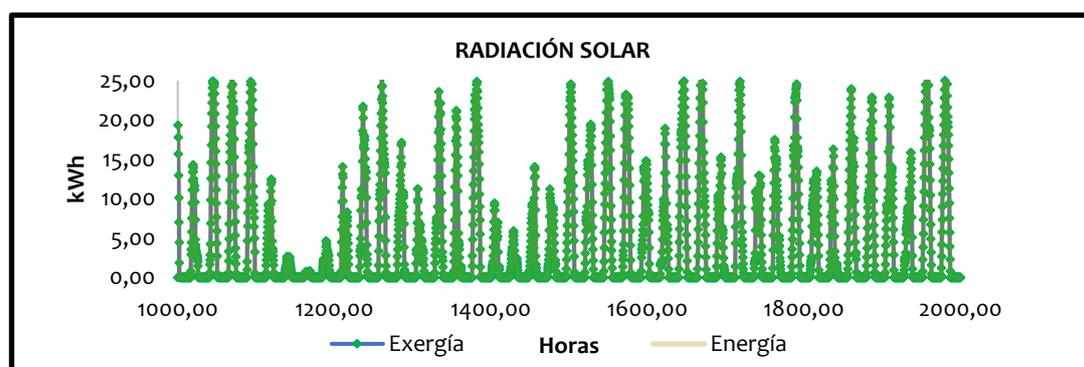


Gráfico 8. Radiación solar

7 TERMOECONOMIA

A continuación, se realiza un análisis termoeconómico. Para ello, se ha definido una estructura productiva y luego se han calculado los costes exergoeconómicos. Para el cálculo de los costes es necesario conocer las proposiciones de la termoeconomía. Por lo tanto, para los cálculos de cada equipo se definirá la proposición que se ha utilizado y por qué. Este análisis ayudará a definir la propuesta de mejora.

7.1 Estructura Productiva

La estructura productiva ayuda a interpretar las proposiciones de la termoeconomía. Esta se realiza aplicando el método de la caja negra, que consiste en definir un producto y un fuel por equipo tal y como se muestra en la Ilustración 2. Los rombos hacen referencia a separación de flujos mientras que los círculos simbolizan la suma de estos.

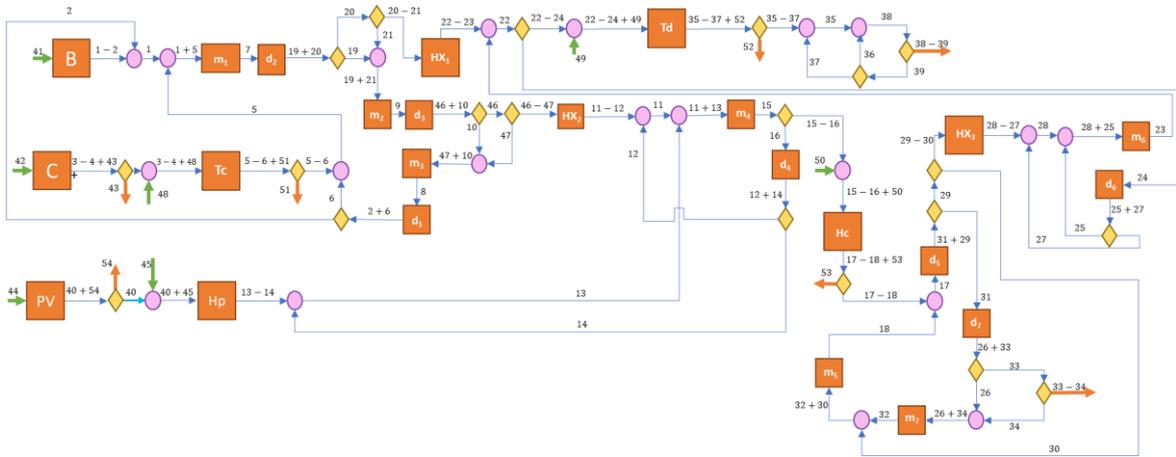


Ilustración 2. Estructura productiva

Para facilitar aún más los cálculos, se ha creado una nueva estructura con una nomenclatura distinta. Esta nomenclatura consiste en asignar a cada flujo un solo número y evitar diferenciales como aparecen en la Ilustración 2. Con esta aplicación la estructura queda como en la Ilustración 3 y los flujos se renombran tal y como aparece en la Tabla 13

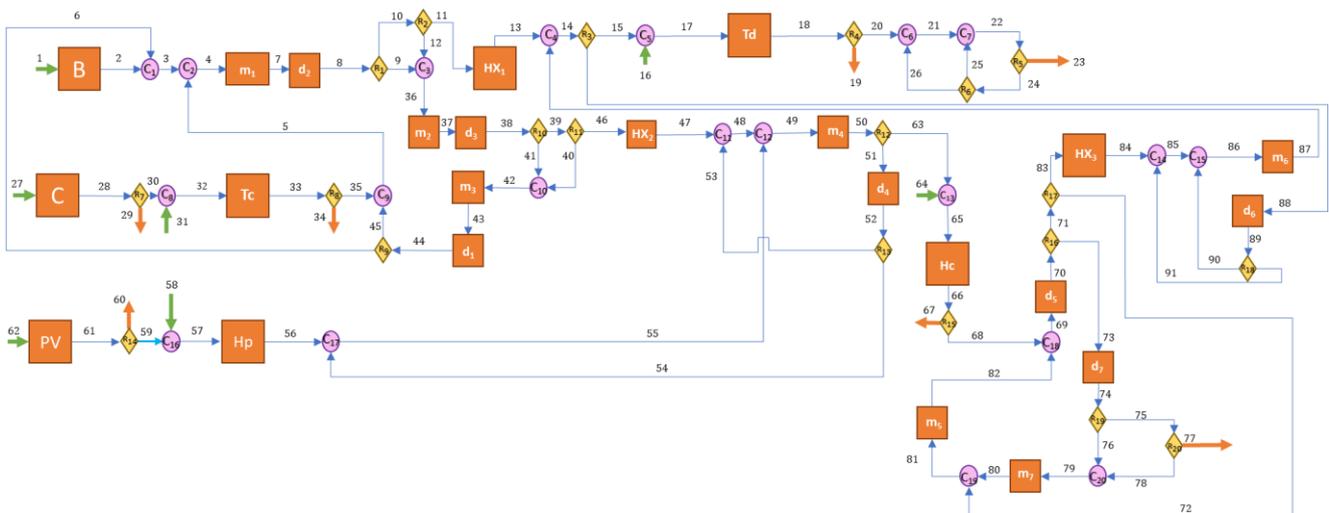


Ilustración 3. Estructura productiva simplificada



Tabla 13. Nuevos valores de la estructura productiva

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nuevo Valor | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Valor anterior | 41 | 1-2 | 1 | 1+5 | 5 | 2 | 7 | 19+20 | 19 | 20 | 20-21 | 21 | 22-23 | 22 | 22-24 |
| B (M_{J_{ex}}) | 3663,56 | 573,85 | 966,48 | 16331,43 | 15364,95 | 392,63 | 16314,79 | 16313,91 | 0,87 | 16313,91 | 5007,24 | 11306,67 | 4191,32 | 27801,19 | 3365,20 |
| Nuevo Valor | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Valor anterior | 49 | 22-24+49 | 35-37+52 | 52 | 35-37 | 35 | 38 | 38-39 | 39 | 36 | 37 | 42 | 3-4+43 | 43 | 3-4 |
| B (M_{J_{ex}}) | 4489 | 7856,02 | 6619,93 | 4226,13 | 2393,8 | 11535,88 | 11535,88 | 3629,89 | 7905,99 | 0,63 | 7905,99 | 64973,98 | 23930,20 | 16868,24 | 7061,96 |
| Nuevo Valor | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| Valor anterior | 48 | 3-4+48 | 5-6+51 | 51 | 5-6 | 19+21 | 9 | 46+10 | 46 | 47 | 10 | 47+10 | 8 | 2+6 | 6 |
| B (M_{J_{ex}}) | 1565,98 | 8627,93 | 7401,71 | 662,15 | 6739,57 | 11306,67 | 11305,41 | 11305,36 | 11305,36 | 9019,27 | 11305,41 | 9019,27 | 9018,20 | 9018,01 | 8625,38 |
| Nuevo Valor | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| Valor anterior | 46-47 | 11-12 | 11 | 11+13 | 15 | 16 | 12+14 | 12 | 14 | 13 | 13-14 | 40+45 | 45 | 40 | 54 |
| B (M_{J_{ex}}) | 2286,09 | 1985,07 | 9296,08 | 10121,40 | 10110,22 | 7704,35 | 7703,11 | 7311,01 | 392,10 | 825,32 | 433,22 | 3367,44 | 3043,55 | 324 | 6913 |
| Nuevo Valor | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 |
| Valor anterior | 40+54 | 44 | 15-16 | 50 | 15-16+50 | 17-18+53 | 53 | 17-18 | 17 | 31+29 | 29 | 30 | 31 | 26+33 | 33 |
| B (M_{J_{ex}}) | 7236,76 | 62829,13 | 2405,86 | 706,56 | 3112,42 | 2796,60 | 169,64 | 2626,96 | 64957,02 | 64953,61 | 33096,85 | 33556,55 | 31856,75 | 31856,75 | 31856,75 |
| Nuevo Valor | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| Valor anterior | 26 | 33-34 | 34 | 26+34 | 32 | 32+30 | 18 | 29-30 | 28-27 | 28 | 28+25 | 23 | 24 | 25+27 | 25 |
| B (M_{J_{ex}}) | 0,404 | 2732,71 | 29124,05 | 29124,05 | 29124,07 | 62680,62 | 62330,06 | 756,60 | 459,7 | 11461,64 | 23679,86 | 23609,87 | 24436,00 | 24436,46 | 12218,23 |
| Nuevo Valor | 91 | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor anterior | 27 | | | | | | | | | | | | | | |
| B (M_{J_{ex}}) | 12218,24 | | | | | | | | | | | | | | |

7.2 Costes Exergéticos

La termoeconomía combina el modelo energético con la economía. Esta se aplica con el fin de conocer los costes exergéticos y económicos de los flujos de un sistema. Por un lado, el coste exergético unitario (k_i^*), hace referencia a la cantidad de exergía necesaria para lograr un flujo con cierta cantidad de exergía. Donde se relacionan el coste necesario para lograr el producto (B_i^*) y el producto (B_i). Los estudios de la termoeconomía se basan en las siguientes proposiciones:

1. El coste de la exergía se conserva ($B_{in}^* = B_{out}^*$).
2. Si no hay valoraciones externas, el coste exergético de los recursos externos será equivalente a la unidad ($K_e^* = \frac{B_e^*}{B_e} = 1$).
3. Las pérdidas generadas tienen coste nulo y todos los costos generados en el proceso se asignan a los productos finales.
4. La cuarta proposición se divide en dos grupos:
 - a. Por un lado, si el flujo pertenece al saliente de un subsistema y a su vez al flujo entrante de ese subsistema, ambos tienen el mismo costo unitario ($B_j^* = \frac{B_i^*}{B_i}$).
 - b. Todos los productos de un subsistema tendrán el mismo coste unitario por que se generan del mismo fuel ($\frac{B_j^*}{B_j} = \frac{B_i^*}{B_i}$)

En el apartado anterior, se ha definido la estructura productiva (Ilustración 3), la cual tiene definidos los subsistemas con un *fuel* y un *producto*. Con este tipo de estructura los costos se pueden expresar en términos de coste del combustible (F_i^*) y del producto (P_i^*). Se puede realizar lo propio con los costes exergéticos unitarios ($k_{P_i}^*$ y $k_{F_i}^*$). Dicha estructura hace posible que las proposiciones puedan aplicarse de forma matricial, realizando una sola matriz que contemple todo el sistema. Esa matriz, estará formada por tres vectores *Fuel-es* (**F**), productos (**P**) e irreversibilidades (**I**) y matrices específicas con la estructura funcional. Los costes exergéticos de los combustibles y productos se obtienen multiplicándolos por los costes unitarios de su exergía.

$$K_F^* = |K_F^*| \cdot K_e^* \quad K_P^* = |K_P^*| \cdot K_e^* \quad (1)$$

$$F^* = K_F^* \cdot F \quad P^* = K_P^* \cdot P \quad (2)$$



Tabla 14. Aplicación de la proposición 2

| | | Fuel | Proposición |
|---------------|--------------|------------|---------------------|
| Proposición 2 | Caldera | B_1^* | $B_1^* = B_1$ |
| | Cogeneración | B_{27}^* | $B_{27}^* = B_{27}$ |
| | PV | B_{62}^* | $B_{62}^* = B_{62}$ |
| | C_5 | B_{16}^* | $B_{16}^* = B_{16}$ |
| | C_8 | B_{31}^* | $B_{31}^* = B_{31}$ |
| | C_{13} | B_{64}^* | $B_{64}^* = B_{64}$ |
| | C_{16} | B_{58}^* | $B_{58}^* = B_{58}$ |

Tabla 15. Aplicación de la proposición 4 con dos productos

| | | Producto 1 | Producto 2 | Proposición |
|-------------------|----------|------------|------------|---|
| Proposición 4 (b) | R_1 | B_9^* | B_{10}^* | $\frac{B_{Producto1}^*}{B_{Producto1}} = \frac{B_{Producto2}^*}{B_{Producto2}}$ |
| | R_2 | B_{11}^* | B_{12}^* | |
| | R_3 | B_{15}^* | B_{88}^* | |
| | R_4 | B_{19}^* | B_{20}^* | |
| | R_5 | B_{23}^* | B_{24}^* | |
| | R_6 | B_{25}^* | B_{26}^* | |
| | R_7 | B_{29}^* | B_{30}^* | |
| | R_8 | B_{34}^* | B_{35}^* | |
| | R_9 | B_6^* | B_{45}^* | |
| | R_{10} | B_{39}^* | B_{41}^* | |
| | R_{11} | B_{40}^* | B_{46}^* | |
| | R_{12} | B_{51}^* | B_{63}^* | |
| | R_{13} | B_{53}^* | B_{54}^* | |
| | R_{14} | B_{59}^* | B_{60}^* | |
| | R_{15} | B_{67}^* | B_{68}^* | |
| | R_{16} | B_{71}^* | B_{73}^* | |
| | R_{17} | B_{72}^* | B_{83}^* | |
| | R_{18} | B_{90}^* | B_{91}^* | |
| | R_{19} | B_{75}^* | B_{76}^* | |
| | R_{20} | B_{77}^* | B_{78}^* | |

Tabla 16. Aplicación de la proposición 1

| | | Proposición |
|---------------|---|-------------------------------|
| Proposición 1 | <p>Todos los componentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Generadores -Intercambiadores -Depósitos -Cámaras de mezclado -Cámaras divisoras -Rombos -Círculos | $B_{Fuel}^* = B_{Producto}^*$ |

Como se ha demostrado en cálculos anteriores, las cámaras de mezclado y división tienen rendimientos energéticos y eficiencias exergéticas casi del 100%, por lo tanto, se descarta la aplicación de mejoras para estos componentes. Por ello, la Tabla 17 recoge solamente los datos relacionados con los equipos principales.

Tabla 17. Cálculos de costes

| Equipo | Fuel [kWh _{ex}] | Producto [kWh _{ex}] | Irreversibilidades [kWh _{ex}] | Coste (fuel) [-] | Coste (producto) [-] |
|------------------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------|----------------------|
| Caldera | 1018 | 159,4 | 858,6 | 1 | 6,38 |
| Cogeneración | 18048 | 6647 | 11401 | 1 | 2,71 |
| PV | 17453 | 2010 | 15443 | 1 | 8,68 |
| Bomba de calor | 935,4 | 120,3 | 815,1 | 1,739 | 13,52 |
| Intercambiador 1 | 1391 | 1164 | 227 | 3,66 | 4,38 |
| Intercambiador 2 | 635 | 551,4 | 83,6 | 1,83 | 2,11 |
| Intercambiador 3 | 210,2 | 127,7 | 82,5 | 2,81 | 4,63 |
| Depósito Tc | 2397 | 2056 | 341 | 2,4 | 2,8 |
| Depósito Td | 2182 | 1839 | 343 | 3,179 | 3,77 |
| Depósito Hc | 864,6 | 776,8 | 87,8 | 3,45 | 3,84 |

El sistema tiene como objetivo abastecer las demandas de ACS y calefacción, por lo tanto, también es interesante realizar los cálculos de los costes de estos. Si se analiza el sistema entero como una sola caja, se obtienen los resultados de la Tabla 18. En esa tabla también aparecerán los sobrantes de electricidad del sistema fotovoltaico y cogeneración.

Tabla 18. Productos totales del sistema

| Productos finales | Exergía [kWh _{ex}] | Energía [kWh _{en}] | Coste exergético [-] |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| ACS | 1008 | 3630 | 2,48 |
| Calefacción | 759 | 2738 | 2,91 |
| Electricidad (PV) | 1920 | 1920 | 8,68 |
| Electricidad (Cogeneración) | 4686 | 4686 | 2,71 |

Una vez hechos los cálculos, se pueden resaltar varios aspectos:

- En un subsistema secuencial, a medida que se avanza en la secuencia, las irreversibilidades se acumulan, ya que los productos de los primeros son el fuel de los últimos.
- Como indica la Tabla 14 y la proposición 2 de la termoeconomía, todos los flujos externos con carácter de *fuel* tendrán coste equivalente a la unidad. Siendo la única excepción la bomba de calor, cuyo coste de *fuel* tiene valor mayor que 1. Esto puede deberse a que su alimentación proviene de la red y del sistema fotovoltaico, el cual tiene irreversibilidades que afectan directamente en el costo del *fuel* de la bomba de calor.
- Al estar encendido todo el tiempo, el motor de cogeneración es el que más irreversibilidades genera. Se vuelve a confirmar la lógica de mantener la cogeneración con prioridad de funcionamiento, ya que, el coste de su producto es el más bajo entre los equipos generadores de calor.
- El coste de producto más elevado se le asigna a la bomba de calor. Como se ha comentado previamente, la electricidad posee un aprovechamiento exergético total, lo que la convierte en exergía de alta calidad y esta se usa para generar calor, que al contrario es de baja calidad. Por lo tanto, resulta lógico pensar que el coste exergético del producto sea mayor si este es considerado de baja calidad y, además, proviene de un producto con exergía de alta calidad.
- Analizando los costes exergéticos, producir calefacción es más caro que el ACS.
- Resulta más barato, desde el punto de vista exergético, generar electricidad a partir del motor de cogeneración; ya que el coste del módulo fotovoltaico es casi cuatro veces mayor.

7.3 Costes exergoeconómicos

Una vez calculados los valores de costes exergéticos, es necesario convertirlos en unidades monetarias. Por ello, se plantea el modelo exergoeconómico, para poder expresar esos valores con la divisa elegida (Tabla 19); en donde únicamente se consideran los costes económicos de los recursos de entrada y no se incluyen los costes debidos a la adquisición, operación y mantenimiento de los equipos. A una parte de los recursos empleados, se les ha asignado un valor previamente, como es el caso del gas natural y la electricidad de la red, que a día de hoy tienen un coste de $14 \frac{\text{c€}}{\text{kWh}}$ y $264,76 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ respectivamente [38] [39]. A la radiación solar, se le atribuye un coste nulo, ya que se dispone de ella sin necesidad de pagar por su aprovechamiento. Por lo tanto, el coste atribuido a los sistemas que estén conectados al sistema fotovoltaico se reducirá cuanto mayor sea la contribución solar (Tabla 20). El coste de la exergía de gas natural se debe mutiplicar por su factor de calidad (1,04), para obtener unidades exergéticas.

$$c_F = |K_F^*| \cdot c_e \quad c_P = |K_P^*| \cdot c_e \quad (3)$$

$$C_F = c_F \cdot F \quad C_P = c_P \cdot P \quad (4)$$

En este apartado se han realizado dos análisis:

- CASO 1) la instalación no cuenta con paneles PV y toda la electricidad que consume la bomba de calor se abastece de red.
- CASO 2) Se instalan paneles PV que alimentan la bomba de calor cuando tienen producción eléctrica.

Tabla 19. Costes exergoeconómicos sin contribución solar. CASO 1

| Equipo | Fuel [kWh _{ex}] | Producto [kWh _{ex}] | Coste (fuel) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ | Coste (producto) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ |
|------------------|---------------------------|-------------------------------|--|--|
| Caldera | 1018 | 159,4 | 14,56 | 89,38 |
| Cogeneración | 18048 | 6647 | 14,56 | 38,01 |
| PV | No hay contribución | | | |
| Bomba de calor | 935,4 | 120,3 | 26,47 | 229,8 |
| Intercambiador 1 | 1391 | 1164 | 56,89 | 67,97 |
| Intercambiador 2 | 635 | 551,4 | 28,45 | 32,77 |
| Intercambiador 3 | 210,2 | 127,7 | 50,10 | 82,46 |
| Depósito Tc | 2397 | 2056 | 38,01 | 44,31 |
| Depósito Td | 2182 | 1839 | 92,16 | 109,4 |
| Depósito Hc | 864,6 | 776,8 | 61,51 | 68,46 |

En caso de existir contribución solar se verán modificados los costes relacionados con los equipos vinculados a las PV; que son: la bomba de calor, el intercambiador 3 y el depósito Hc, por ello, la Tabla 20 solo muestra valores de estos subsistemas.

Tabla 20. Costes exergoeconómicos con contribución solar. CASO 2

| Equipo | Fuel [kWh _{ex}] | Producto [kWh _{ex}] | Coste (fuel) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ | Coste (producto) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ |
|------------------|---------------------------|-------------------------------|--|--|
| PV | 17453 | 2010 | 0 | 0 |
| Bomba de calor | 935,4 | 120,3 | 21,37 | 185,49 |
| Intercambiador 3 | 210,2 | 127,7 | 45,08 | 74,20 |
| Depósito Hc | 864,6 | 776,8 | 55,35 | 61,6 |

Los costes de los productos principales del sistema se clasifican en la Tabla 21. Como ocurre con los costes anteriores, si se aprovecha el aporte solar el coste de los productos disminuye para todos los casos. De hecho, el sistema fotovoltaico genera un ahorro de 857,6 € al año.

Tabla 21. Coste de los productos finales

| Producto | Producto [kWh _{ex}] | CASO 1 | CASO 2 | CASO 1 | CASO 2 |
|-------------------|-------------------------------|--|---|--|---|
| | | Coste sin PV [$\frac{c\text{€}}{kWh_{ex}}$] | Coste Con aporte PV [$\frac{c\text{€}}{kWh_{ex}}$] | Coste sin PV [$\frac{c\text{€}}{kWh_{en}}$] | Coste Con aporte PV [$\frac{c\text{€}}{kWh_{en}}$] |
| Calefacción | 759,1 | 52,94 | 47,73 | 190,93 | 172,14 |
| ACS | 1008 | 74,93 | 69,20 | 269,76 | 249,13 |
| Electricidad (C) | 4686 | 21,34 | 21,34 | 21,34 | 21,34 |
| Electricidad (PV) | 2010 | - | 0 | - | 0 |

8 ANÁLISIS CON DISTINTAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Para ampliar los resultados del análisis y profundizar en ellos, se han establecido dos localizaciones con distintas características climáticas. En ambas se simulará la instalación según las demandas de la zona. Por un lado, se analizará la situación en la ciudad de Logroño, la cual posee un clima más frío y seco que el de Portugalete. Por el otro lado, se ha escogido la ciudad de Sevilla, caracterizada por un clima con temperaturas más elevadas.

Tabla 22. Demanda ACS

| Número de dormitorios | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | ≥6 |
|-------------------------------|---------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|
| Número de Personas | 1,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 |
| Criterio de demanda | Litros/día-persona | | | | | | |
| Hospitales y clínicas | 55 | | | | | | |
| Ambulatorio y centro de salud | 41 | | | | | | |
| Hotel ***** | 69 | | | | | | |
| Hotel **** | 55 | | | | | | |
| Hotel *** | 41 | | | | | | |
| Hotel/hostal ** | 34 | | | | | | |
| Camping | 21 | | | | | | |
| Hostal/pensión * | 28 | | | | | | |
| Residencia | 41 | | | | | | |
| Centro penitenciario | 28 | | | | | | |
| Albergue | 24 | | | | | | |
| Vestuarios/Duchas colectivas | 21 | | | | | | |
| Escuela sin ducha | 4 | | | | | | |
| Escuela con ducha | 21 | | | | | | |
| Cuarteles | 28 | | | | | | |
| Fábricas y talleres | 21 | | | | | | |
| Oficinas | 2 | | | | | | |
| Gimnasios | 21 | | | | | | |
| Restaurantes | 8 | | | | | | |
| Cafeterías | 1 | | | | | | |
| Nº viviendas | N≤3 | 4≤N≤10 | 11≤N≤20 | 21≤N≤50 | 51≤N≤75 | 76≤N≤100 | N≥101 |
| Factor de centralización | 1 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,70 |

Para ambos casos, la demanda de ACS será la misma que la del edificio del Portugalete, ya que esta se puede estimar aproximadamente mediante las tablas que facilita el CTE (Tabla 22) y presupone un consumo por persona y día según el uso de la vivienda; para poder definir el perfil horario a lo largo de los días del año, se ha usado programa DHWCalc.

Sin embargo, la demanda de calefacción no será la misma ni en Sevilla ni en Logroño respecto Portugalete y, por lo tanto, se ha utilizado el método simplificado de grados día para estimar las demandas según la localización. Esto se ha hecho de la siguiente manera;

- Con la ayuda de PVGIS se ha calculado la temperatura ambiente por hora en cada ubicación a lo largo del año [40]. La temperatura base es de 12°C.

$$Q_{calefacción}[Kh] = T_{base} - T_{ambiente} \quad (Si: T_{base} > T_{ambiente}) \quad (1)$$

$$Q_{calefacción}[Wh] = (UA_{vent} - UA_{Edificio}) \cdot Q_{calefacción}[Kh] \quad (2)$$

$$Q_{calefacción} \left[\frac{Wh}{m^2} \right] = \frac{\sum Q_{calefacción \text{ por mes}}}{Superficie} \quad (3)$$

- La diferencia de la temperatura base y la temperatura ambiente (las horas en las que la ambiente sea menor a la base) serán los grados día que ayudarán a calcular la demanda de calefacción del edificio respecto a la temperatura (°C h).
- Si esos grados día se multiplica por los coeficientes aproximados de transmitancia y ventilación del edificio ($UA_{Edificio}$ y UA_{vent}), se puede estimar aproximadamente, de una forma simplificada, la demanda en unidades de energía (Wh) según la localización.
- Una vez obtenida la demanda por horas es necesario calcular la acumulada por mes, para poder conocer el valor anual por área de esta $\left(\frac{kWh}{m^2 \text{ año}} \right)$.

$$UA_{Edificio} \left[\frac{W}{K} \right] = UA_{Fachada} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \cdot Superficie [m^2] \quad (10)$$

$$UA_{vent} \left[\frac{W}{K} \right] = Vent \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot cp \left[\frac{J}{kgK} \right] \quad (11)$$

Para calcular aproximadamente el $UA_{edificio}$ ($811,5 \frac{W}{K}$), es necesario conocer los datos de transmitancia de las fachadas que componen el edificio (Tabla 1). En el caso del UA_{vent} , la información no era conocida y se han usado las tablas que facilita el CTE (Tabla 23). Teniendo en cuenta los locales húmedos y secos de cada vivienda, el UA_{vent} total tiene un valor de $42 \frac{W}{K}$. Se ha calculado una demanda de calefacción anual por cada localización.

Tabla 23. Demanda de ventilación

| Tipo de vivienda | Caudal mínimo q_v en l/s | | | | |
|---------------------|----------------------------------|----------------------|---|--------------------------------|------------------|
| | Locales secos ^{(1) (2)} | | | Locales húmedos ⁽²⁾ | |
| | Dormitorio principal | Resto de dormitorios | Salas de estar y comedores ⁽³⁾ | Mínimo en total | Mínimo por local |
| 0 ó 1 dormitorios | 8 | - | 6 | 12 | 6 |
| 2 dormitorios | 8 | 4 | 8 | 24 | 7 |
| 3 o más dormitorios | 8 | 4 | 10 | 33 | 8 |

(1) En los locales secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo local se den usos de local seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros locales pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

8.1 Clima cálido. Sevilla

Para la ciudad de Sevilla la instalación se enfrentaría a un clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves con temperaturas agradables y veranos de excesivo calor. Se ha realizado el mismo estudio que el de Portugalete. Primero, el Gráfico 9 muestra los consumos principales de energía y la Tabla 24 el rendimiento energético de los equipos principales. Tanto las cámaras de mezclado como los intercambiadores tienen rendimientos muy elevados y no suponen variaciones significativas en los consumos. Por ello, se han excluido del análisis energético para las dos localizaciones.

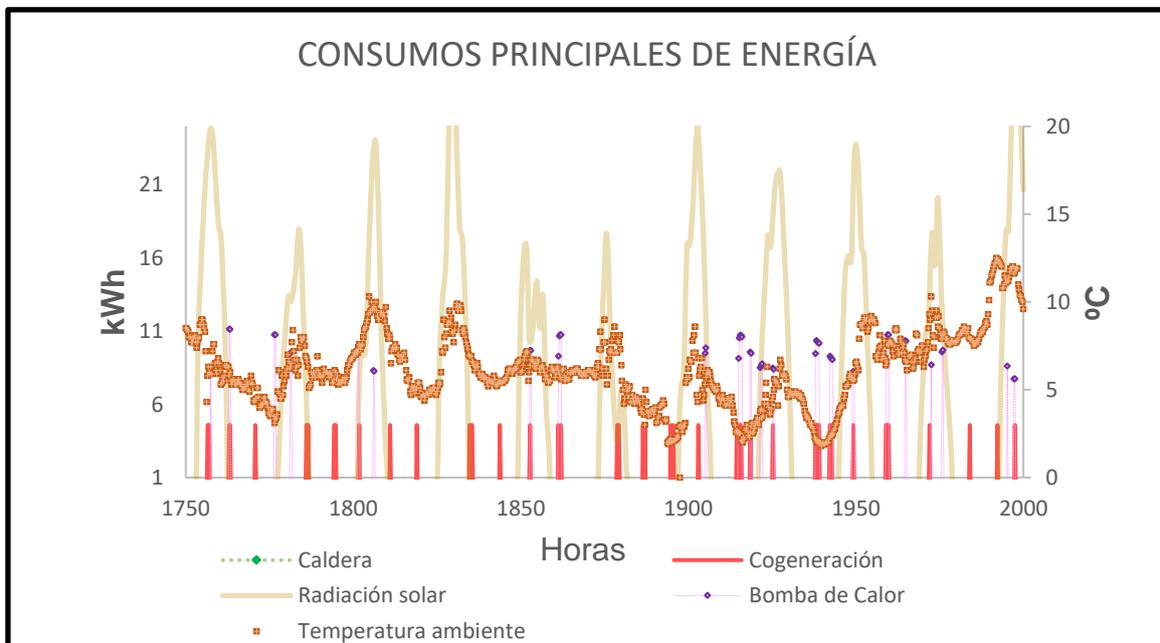


Gráfico 9. Consumo de energía de los equipos principales en Sevilla

Tabla 24. Rendimientos energéticos en Sevilla

| Equipo | Fuel [kJ] | Producto [kJ] | Pérdidas [kJ] | COP [-] | Rendimiento eléctrico [%] | Rendimiento térmico [%] |
|---------|-------------|---------------|---------------|---------|---------------------------|-------------------------|
| Caldera | - | - | - | | | - |
| Motor C | 4248761,34 | 3823850,06 | 424911,27 | | 27 | 62,99 |
| PV | 71881132,13 | 8625735,86 | 63255396,27 | | 12,00 | |
| BC | 3063964,39 | 4389715,49 | | 1,43 | | |
| DEP TC | 3626061,56 | 2676684,50 | 949377,06 | | | 73,81 |
| DEP HC | 11409874,51 | 9048791,16 | 2361083,36 | | | 79,30 |
| DEP TD | 17801138,49 | 15403381,84 | 2397756,65 | | | 86,53 |

Después, se ha realizado en análisis exergético. Por un lado, se ha obtenido el consumo exergético (Gráfico 10) y por el otro, la Tabla 25 con las eficiencias. Se hace especial hincapié en los equipos generadores, ya que, al tratarse de un sistema secuencial, cuantas menos pérdidas e irreversibilidades se arrastren desde el principio mayor será el rendimiento.

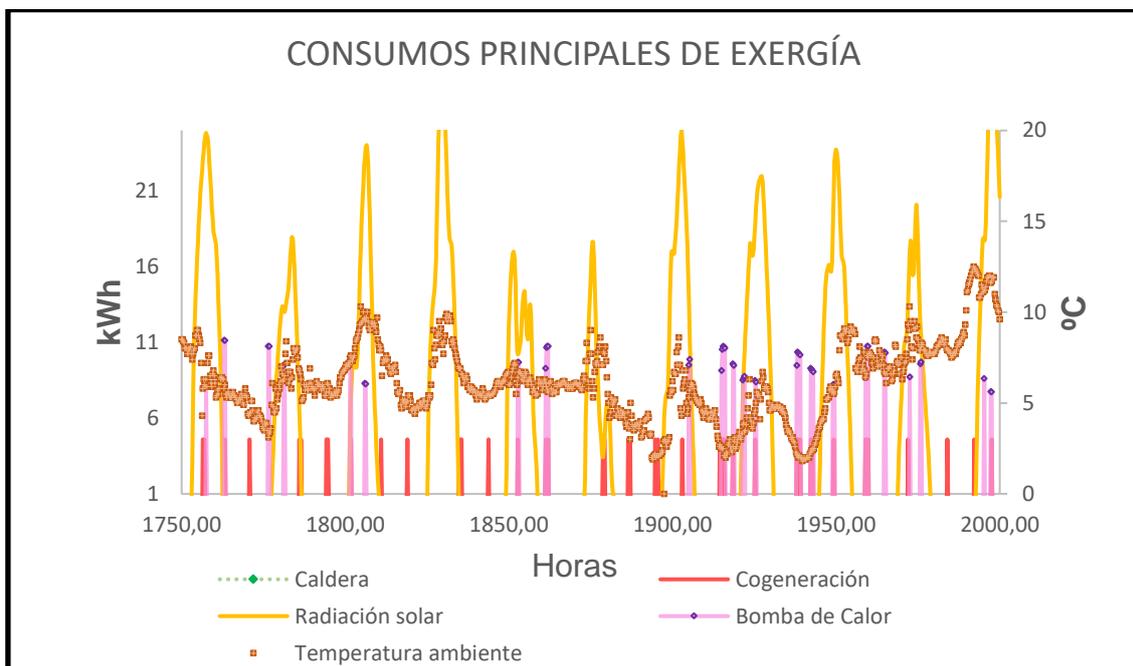


Gráfico 10. Consumo de exergía Sevilla

Tabla 25. Eficiencia exergética Sevilla

| Equipo | Fuel [kJ _{ex}] | Producto [kJ _{ex}] | Irreversibilidades [kJ _{ex}] | HP [-] | Eficiencia eléctrica [%] | Eficiencia térmica [%] |
|---------|--------------------------|------------------------------|--|--------|--------------------------|------------------------|
| Caldera | - | - | - | | | - |
| Motor C | 4418711,79 | 1675605,84 | 2743105,95 | | 25,96 | 11,96 |
| PV | 72035780,22 | 8625735,86 | 63410044,36 | | 11,97 | |
| BC | 3317660,46 | 584533,32 | 2733127,13 | 17,62 | | |
| DEP TC | 6048894,27 | 3664467,67 | 2384426,60 | | | 60,58 |
| DEP HC | 1205702,96 | 961495,99 | 244206,97 | | | 79,75 |
| DEP TD | 2158853,08 | 685170,11 | 1473682,97 | | | 31,74 |
| INT 1 | 1318060,88 | 600954,76 | 717106,12 | | | 45,59 |
| INT 2 | 1866,65 | 1523,10 | 343,55 | | | 81,60 |
| INT 3 | 234568,91 | 203818,54 | 30750,38 | | | 86,89 |

La Tabla 26 recoge los resultados del estudio termoeconómico, mientras que la Tabla 28 hace lo propio con el estudio exergoeconómico. Para esta localidad se plantea el estudio con contribución solar, ya que no tendría sentido desde el punto de vista de la eficiencia (exergética y energética) no utilizar un recurso abundante y de coste nulo. En la Tabla 27 y Tabla 29 se puede observar el coste de los recursos demandados y producidos.

Tabla 26. Costes exergéticos por equipos en Sevilla

| Equipo | Coste (fuel) [-] | Coste (producto) [-] |
|----------------|-----------------------------|----------------------|
| Caldera | No existe aporte de caldera | |
| Cogeneración | 1 | 2,63 |
| PV | 1 | 8,56 |
| Bomba de calor | 1,55 | 9,82 |

Tabla 27. Costes exergético de los productos en Sevilla

| Producto | Coste [-] |
|-----------------------------|-----------|
| ACS | 3,11 |
| Calefacción | 2,95 |
| Electricidad (PV) | 8,56 |
| Electricidad (Cogeneración) | 2,63 |

Tabla 28. Costes exergoeconómicos por equipos en Sevilla

| Equipo | Coste (fuel) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ | Coste (producto) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ |
|----------------|---|---|
| Caldera | 14,56 | - |
| Cogeneración | 14,56 | 48,4 |
| PV | 0 | 0 |
| Bomba de calor | 18,54 | 182,06 |

Tabla 29. Costes exergoeconómicos de los productos en Sevilla

| Producto | Coste $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$ |
|-------------------|--|
| Calefacción | 45,94 |
| ACS | 63,09 |
| Electricidad (C) | 23,65 |
| Electricidad (PV) | - |

8.2 Clima frío. Logroño.

Para la ciudad de Logroño, la instalación afronta un clima caracterizado por inviernos duros con temperaturas muy frías. Se ha realizado el mismo estudio que anteriormente. Primero, el Gráfico 11 muestra los consumos principales de energía y la Tabla 30 el rendimiento energético de los equipos principales.

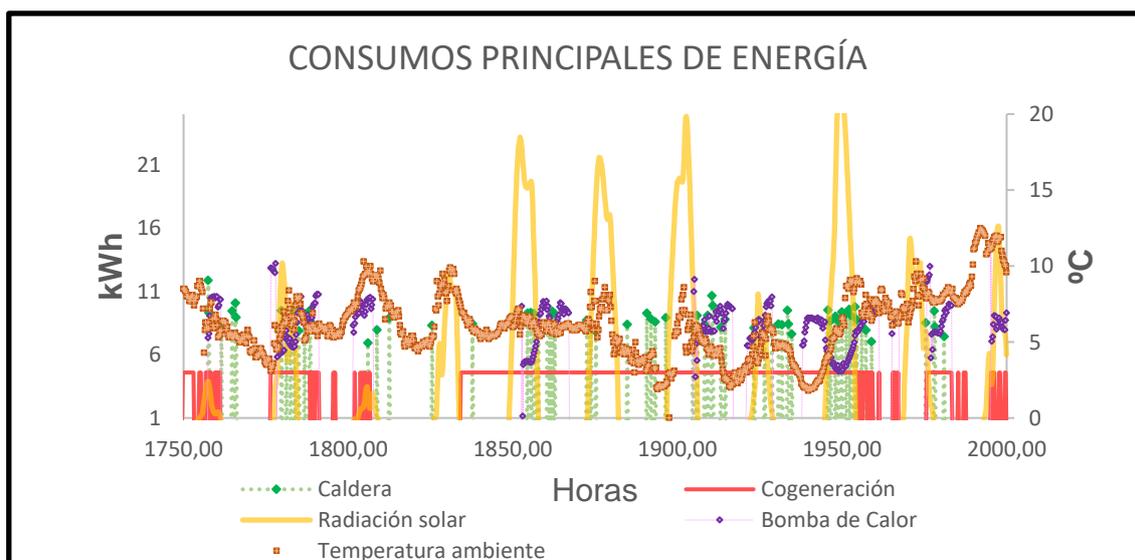


Gráfico 11. Consumo de energía de los equipos principales en Logroño

Tabla 30. Eficiencia energética Logroño

| Equipo | Fuel [kJ] | Producto [kJ] | Pérdidas [kJ] | COP [-] | Rendimiento eléctrico [%] | Rendimiento térmico [%] |
|---------|-------------|---------------|---------------|---------|---------------------------|-------------------------|
| Caldera | 16491270,82 | 15943100,98 | 548169,84 | | | 96,67 |
| Motor C | 26517561,04 | 24599802,09 | 1917758,95 | | 27 | 65,76 |
| PV | 45628745,32 | 5475449,44 | 40153295,88 | | 12,000 | |
| BC | 17627185,20 | 18485983,49 | | 1,04 | | |
| DEP TC | 15640948,33 | 14210948,12 | 1430000,21 | | | 90,85 |
| DEP HC | 28521397,49 | 23449126,25 | 5072271,25 | | | 82,21 |
| DEP TD | 18102780,06 | 11586531,84 | 6516248,22 | | | 64 |

Después, se ha realizado en análisis exergético. Por un lado, se ha obtenido el consumo exergético (Gráfico 12) y por el otro, la Tabla 31 con las eficiencias. En este caso, los intercambiadores se han mantenido ya que su eficiencia si varia con respecto a los cálculos realizados en Portugaleta.

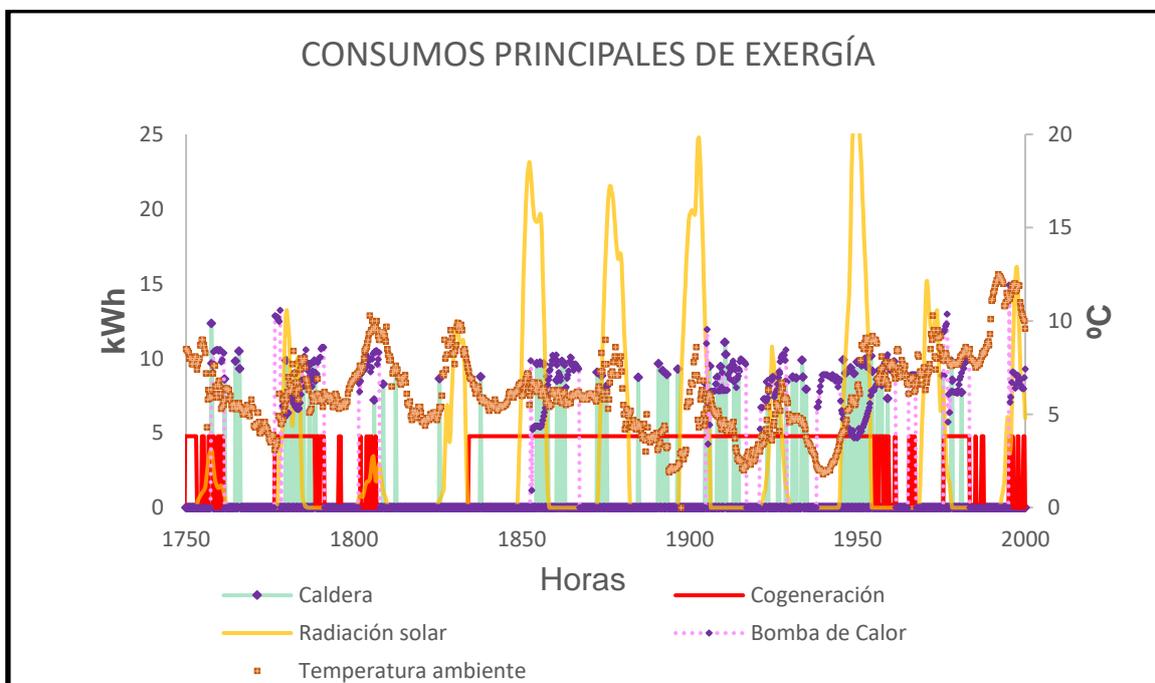


Gráfico 12. Consumo de exergía Logroño

Tabla 31. Eficiencia exergética Logroño

| Equipo | Fuel [kJ _{ex}] | Producto [kJ _{ex}] | Irreversibilidades [kJ _{ex}] | HP [-] | Eficiencia eléctrica [%] | Eficiencia térmica [%] |
|---------|--------------------------|------------------------------|--|--------|--------------------------|------------------------|
| Caldera | 8588607,33 | 1331234,14 | 7257373,19 | | | 15,50 |
| Motor C | 27578263,48 | 10020658,26 | 17557605,23 | | 25,96 | 10,37 |
| PV | 45842165,18 | 5475449,44 | 40366715,75 | | 11,94 | |
| BC | 18385243,70 | 2052813,21 | 16332430,50 | 11,17 | | |
| DEP TC | 6754349,06 | 4697367,36 | 2056981,70 | | | 69,55 |
| DEP HC | 2553211,82 | 1933194,03 | 620017,78 | | | 75,72 |
| DEP TD | 1718471,54 | 983441,36 | 735030,18 | | | 57,23 |
| INT 1 | 143922,05 | 118522,59 | 25399,46 | | | 82,35 |
| INT 2 | 4473557,48 | 3736831,58 | 736725,89 | | | 83,53 |
| INT 3 | 1075380,49 | 641806,41 | 433574,08 | | | 59,68 |

La Tabla 32 recoge los resultados del estudio exergético, mientras que la Tabla 34 hace lo propio con el estudio exergoeconómico. Para este caso se plantea el estudio sin contribución solar, ya que como se muestra en el Gráfico 11, la radiación solar es casi inexistente. En la Tabla 33 y Tabla 35 se puede observar el coste de los recursos demandados y producidos.

Tabla 32. Costes exergéticos por equipos en Logroño

| Equipo | Coste (fuel) [-] | Coste (producto) [-] |
|----------------|------------------|----------------------|
| Caldera | 1 | 6,45 |
| Cogeneración | 1 | 3,31 |
| PV | 1 | 9,65 |
| Bomba de calor | 2,82 | 13,75 |

Tabla 33. Costes exergéticos de los productos en Logroño

| Producto | Coste [-] |
|-----------------------------|-----------|
| ACS | 2,48 |
| Calefacción | 2,91 |
| Electricidad (PV) | 9,65 |
| Electricidad (Cogeneración) | 3,31 |



Tabla 34. Costes exergoeconómicos por equipos en Logroño

| Equipo | Coste (fuel) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}\right]$ | Coste (producto) $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}\right]$ |
|----------------|--|--|
| Caldera | 14,56 | 93,94 |
| Cogeneración | 14,56 | 38,26 |
| PV | 0 | 0 |
| Bomba de calor | 18,54 | 255,5 |

Tabla 35. Costes exergoeconómicos de los productos en Logroño

| Producto | Coste $\left[\frac{\text{c€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}\right]$ |
|-------------------|---|
| Calefacción | 49,80 |
| ACS | 71,62 |
| Electricidad (C) | 22,65 |
| Electricidad (PV) | 0 |

CONCLUSIONES

Este apartado recoge las conclusiones en base a los resultados obtenidos: por una parte, se analizan los resultados del edificio de Portugalete y, por otra parte, se comparan los resultados de la instalación en Sevilla y en Logroño.

9 CONCLUSIONES

En este apartado se recogen las conclusiones del trabajo: inicialmente se hará referencia a los resultados de la instalación de Portugalete y, a continuación, a las instalaciones de Sevilla y Logroño.

9.1 INSTALACIÓN DE PORTUGALETE

Para la simulación en Portugalete, se puede observar que los equipos con mayor rendimiento energético y exergético son las cámaras separadoras, seguidas de las mezcladoras, los intercambiadores y los depósitos de inercia (siendo cercanos o superiores al 90%). Esto se debe a que cuando existe intercambio térmico entre dos fluidos a diferente estado térmico, la destrucción de exergía es inevitable; el resultado de la mezcla entre dos fluidos a diferentes temperaturas (como sucede en los mezcladores o en los depósitos de inercia) es un fluido mezclado a unas condiciones intermedias ponderadas entre ambos fluidos, lo que hace disminuir la capacidad de hacer trabajo útil del fluido más caliente; esto es, destruye exergía.

En cambio, los equipos generadores no tienen resultados tan positivos, sobre todo exergéticamente. La razón principal se debe a las destrucciones intrínsecas que se generan en la conversión de energía química (quema de gas natural) o electricidad en calor. El calor tiene, por definición, una exergía proporcional al índice de Carnot ($1 - T_i/T_0$) lo que hace que sea inferior a la exergía del gas natural o la electricidad, con un factor de calidad de 1.04 y 1, respectivamente. Por ello, los equipos que generan calor por medio de flujos de energía de alta calidad son, por definición, ineficientes con bajos rendimientos exergéticos. Por la misma razón, la cogeneración tiene un rendimiento exergético superior que la bomba de calor y la caldera ya que con la quema del gas natural produce simultáneamente calor (baja calidad) y electricidad (100 % exergía).

A primera vista, el funcionamiento de la instalación respeta el control establecido, es decir, cuando existe demanda se enciende el motor de cogeneración, la bomba y finalmente la caldera. Observando la Tabla 18 y la Tabla 19, se deduce que a medida que se avanza en la cadena energética (desde generación, pasando por distribución y llegando a elementos terminales) los costes van en aumento, ya que al tratarse de un sistema casi secuencial las irreversibilidades se van sumando, y por ende, los costes se acumulan. A fin y al cabo, por definición, el coste exergético representa la cantidad de recursos que se han “sacrificado” para poder llegar a un punto concreto de la instalación. Por ello, los productos que se relacionen con los equipos generadores que mayores costes generan, serán más caros. Es el caso de la calefacción y el ACS, donde la calefacción posee un coste más elevado que el del



agua caliente sanitaria; sobre todo considerando las elevadas destrucciones de exergía que se producen precisamente en los radiadores.

En cuanto a energía, desde el punto de vista intensivo, el equipo generador con mayor rendimiento es la caldera, seguido de la cogeneración. La bomba de calor posee un COP de 1,39 que es bastante bajo en comparación con las bombas de calor de última generación. Desde el punto de vista de la energía, se podría plantear la posibilidad de cambiar la bomba de calor existente por otra de mejor COP. Por otro lado, desde el punto de vista extensivo, exergéticamente la bomba de calor es el equipo que menos irreversibilidades totales genera (Tabla 17). Esto se debe a las potencias en juego, ya que la capacidad de la bomba de calor es inferior a la de la caldera y el tiempo de funcionamiento es bastante reducido.

Atendiendo a los resultados, es lógico que se priorice el funcionamiento del equipo de cogeneración, ya que trabaja con la mayor eficiencia exergética y tiene el mejor rendimiento. Además, como se ha comentado, no se debe olvidar que de una fuente de calor (exergía de baja calidad), se obtiene electricidad (exergía de alta calidad) y calor, lo que hace que su eficiencia aumente respecto a otros equipos como la caldera de condensación. Sin embargo, no desmerecen los esfuerzos realizados para hibridar la bomba de calor e intentar adaptarla con energía solar PV; ya que, en términos económicos, la electricidad producida sería gratuita.

Según el estudio termoeconómico, resulta más barato producir calor (ACS o Calefacción) desde el motor de cogeneración, por lo tanto, este remarca la necesidad de dar prioridad al sistema de cogeneración en el control de la instalación. Para la generación de ACS, se utilizan la caldera y el motor de cogeneración en gran parte, dadas las necesidades térmicas de mantener el depósito sobre los 60 °C; mientras que para la calefacción se hace uso de la cogeneración y bomba de calor. Esto hace, entre otras cosas, que la calefacción sea más cara que el ACS. El módulo fotovoltaico, genera productos de coste exergético muy alto debido a las altas irreversibilidades en la transformación de radiación solar a electricidad, que generan ahorros generosos cuando la energía sobra y esta se inyecta a la red. Sin embargo, desde el punto de vista exergoeconómico, el coste monetario del recurso renovable del sol es nulo, por lo que interesa generar la mayor cantidad de productos desde el módulo fotovoltaico.

En resumen, para mejorar la eficiencia de la instalación, convendría remplazar la bomba de calor por una de mejor COP o hibridarla el máximo de tiempo posible con paneles PV. La caldera, aunque no posee una eficiencia muy alta, es el último recurso en la cadena de mando, por lo tanto, no tiene tanta influencia, pero se podría valorar mejorar algún aspecto respecto a esta. Para el bien de la economía, se podría plantear un modelo de control distinto, donde se ajuste el funcionamiento de la instalación de tal manera que el módulo fotovoltaico tenga mayor presencia e inyecte más energía a la red, ya que el coste que tiene es el más elevado y genera mayor ahorro económico por unidad de energía.

9.2 INSTALACIÓN DE SEVILLA Y LOGROÑO

Primero se analizarán los diferentes datos logrados en las distintas localidades de estudio, enfocándolos sobre los tres pilares del proyecto; la energía, la exergía y la termoeconomía. En segundo lugar, se analizarán las características de los productos que genera el sistema. Para finalizar, se dedica un párrafo a las conclusiones, con posibles alternativas para adecuar la instalación en otro tipo de lugares. Como ya se ha comprobado, los equipos con más influencia son los generadores, por lo tanto, este último apartado irá dirigido a ellos.

En cuanto a los equipos generadores, primero, se analiza la caldera de gas natural. La demanda de calefacción y ACS es importante para el funcionamiento de esta. De hecho, en la ciudad de Sevilla se podría no incluir la caldera o simplemente dejarla como sistema de apoyo, ya que, como muestran los Gráfico 9 y Gráfico 10, el funcionamiento del equipo en esta ciudad es nulo. Esto se debe a que la demanda de calefacción es muy baja y como el sistema de control no da prioridad a la caldera, esta no llega a activarse por que el sistema no lo considera necesario; por ello, la instalación estaría sobredimensionada. En cambio, en la ciudad de Logroño ocurre lo contrario, como la demanda de calefacción es superior al caso base de Portugalete, casi el 100% de las veces que se activa el sistema de cogeneración, es necesario que la caldera lo apoye (Gráfico 11 y Gráfico 12). Además, la Tabla 37 resalta que en Logroño el sistema de calefacción es más eficiente que en el caso base. Se ha de tener en cuenta, que la simulación se ha realizado en un periodo invernal, por lo tanto, la diferencia entre ambas ciudades es aún mayor.

Con el motor de cogeneración sucede algo muy parecido. Según los Gráfico 10, en Sevilla arranca y para numerosas veces, ya que, el sistema guarda prioridad absoluta al motor de cogeneración por cuestiones de eficiencia; para evitar estos arranques y paradas, convendría diseñar un sistema de almacenamiento que se adaptara al uso continuo de la cogeneración y recogiera el calor además de producir electricidad. En Sevilla, al tener un funcionamiento tan discontinuo el consumo aumenta por los arranques y, por ende, el *fuel* de máquina aumenta, haciendo que la eficiencia disminuya. Sin embargo, en Logroño ocurre lo contrario, el funcionamiento del motor es mucho más lineal (Gráfico 11 y 12); por lo que trabaja de una forma más eficiente. Pero donde más se aprecia la diferencia es en la eficiencia exergética (Tabla 37). Por lo tanto, si se plantease una instalación similar para un clima cálido como el de Sevilla, habría que cambiar el sistema de control, mientras que en la zona fría se podría mantener el existente.

La instalación fotovoltaica y la bomba de calor, son dos equipos que van de la mano, así que, se analizaran a la vez. El consumo de la bomba de calor se dispara para la ciudad de Sevilla, como bien muestran los Gráfico 9 y Gráfico 10. Pero resulta que los Gráfico 11 y Gráfico 12 dicen que en Logroño también se hace bastante uso de la bomba de calor. Ahora bien, si se atiende a las Tabla 37 y Tabla 39, usar la bomba de calor en la capital riojana es bastante más caro y menos eficiente que en la capital Hispalense. Existe un recurso cuyo coste es nulo y que es más abundante en el clima cálido, la radiación solar. En La Rioja, la irradiancia es menor que en Andalucía, por lo tanto, será necesario usar más energía proveniente de la red

eléctrica, y eso encarece y mucho el proceso de generación mediante la bomba de calor. En consecuencia, en Sevilla se ahorrarían 730 € por cada megavatio generado por la bomba de calor. Por lo tanto, esta es otra razón por la que se debiera de plantear otro modelo para el control en cada localidad, incluso se podría pensar en otro sistema de generación ya que el COP de la bomba de calor en Logroño es muy bajo, cercano a la unidad.

En cuanto a los productos de cada sistema, los precios varían bastante dependiendo del lugar. La caldera es imposible de comparar, ya que en uno de los dos casos no entra en juego. Como ya se ha explicado anteriormente, la bomba de calor es más eficiente y más barata en Sevilla y esto repercute en los productos finales. Como gran parte de la energía generada (ACS, Calefacción y electricidad) proviene de la radiación solar cuyo coste es totalmente nulo, los precios de los productos finales son menores, tal y como se aprecia en la Tabla 39. Sin embargo, en Logroño se usan más los combustibles fósiles y la electricidad de la red, por lo tanto, al plantear un sistema cuasi-secuencial, los precios aumentan cuanto más se avanza en el sistema (Tabla 35), ya que estos *fueles* son más caros. Los productos de la cogeneración, con motivo de los numerosos arranques y paradas que conllevan un mayor consumo, son más caros en la capital andaluza.

Para concluir con el apartado de conclusiones, resaltar la importancia del buen planteamiento de las instalaciones, equipos, aislamientos, transporte de energía, etc. pero sobre todo el establecer un modelo de control con una base óptima. Este ha sido un claro ejemplo, de como un buen modelo de control para un clima o localización equivocada puede dar lugar a costes elevados en la producción de la energía. Además, teniendo en cuenta el contexto al que se enfrenta el mercado energético, donde, el precio de los recursos está cada vez más elevado, resulta vital encontrar la manera de evitar cualquier consumo que no sea necesario. En conclusión, pequeños cambios en el control o la investigación en estos, pueden dar lugar a nuevos modelos que generen ahorros energéticos y económicos.

9.3 TABLAS DE RESUMEN

En este apartado se exponen los resultados para facilitar la interpretación de las conclusiones.

Tabla 36. Rendimientos energéticos

| RENDIMIENTOS DE LOS EQUIPOS GENERADORES [%] | | | |
|---|-------------|---------|---------|
| ESTUDIO | PORTUGALETE | SEVILLA | LOGROÑO |
| CALDERA | 96,57 | - | 96,67 |
| COGENERACIÓN | 94,82 | 89,99 | 92,76 |
| BOMBA DE CALOR (COP) | 1,39 | 1,43 | 1,04 |
| SISTEMA FOTOVOLTAICO | 12 | 12 | 12 |

Tabla 37. Eficiencias exergeticas

| EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS GENERADORES [%] | | | |
|---|-------------|---------|---------|
| ESTUDIO | PORTUGALETE | SEVILLA | LOGROÑO |
| CALDERA | 15,66 | - | 15,50 |
| COGENERACIÓN | 36,83 | 37,92 | 26,33 |
| BOMBA DE CALOR | 12,89 | 17,62 | 11,17 |
| SISTEMA FOTOVOLTAICO | 11,9 | 11,97 | 11,94 |

Tabla 38. Costes exergeticos

| COSTES EXERGETICOS DE LOS PRODUCTOS FINALES | | | |
|---|-------------|---------|---------|
| ESTUDIO | PORTUGALETE | SEVILLA | LOGROÑO |
| ACS | 2,48 | 3,11 | 2,48 |
| CALEFACCIÓN | 2,91 | 2,95 | 2,91 |
| PV | 8,68 | 8,56 | 9,65 |
| ELECTRICIDAD (C) | 2,71 | 2,63 | 3,31 |

Tabla 39. Costes exergoeconomicos

| COSTES EXERGOECONÓMICOS DE LOS PRODUCTOS FINALES $\left[\frac{c\text{€}}{kWh_{\text{ex}}} \right]$ | | | | |
|---|-------------|----------------------|---------|---------|
| ESTUDIO | PORTUGALETE | PORTUGALETE (con PV) | SEVILLA | LOGROÑO |
| ACS | 269,76 | 249,13 | 63,09 | 71,62 |
| CALEFACCIÓN | 190,93 | 172,14 | 45,94 | 49,80 |
| PV | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ELECTRICIDAD (C) | 21,34 | 21,34 | 23,65 | 22,65 |

10 AGRADECIMIENTOS

Se quiere agradecer al área térmica del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco (LCCE) y en especial al Catedrático Emérito José María Pedro Salazar-Lizarraga sin el cual este trabajo no habría sido posible.



BIBLIOGRAFÍA

En este apartado se mencionan las referencias que se han consultado para la posible realización del estado del arte.

1. LANGEVIN, Jared; HARRIS, Chioke B.; REYNA, Janet L. Assessing the potential to reduce US building CO₂ emissions 80% by 2050. *Joule*, 2019, vol. 3, no 10, p. 2403-2424.
2. SANTOS, Rita Andrade, et al. Auto-responsive technologies for thermal renovation of opaque facades. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 217, p. 109968.
3. CARO, Rosana; SENDRA, Juan José; GONZÁLEZ, Carmen María Muñoz. The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in mediterranean climate. A case study in Seville, Spain. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 250, p. 111302.
4. ASTE, Niccolò, et al. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: Biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. *Energy*, 2020, vol. 206, p. 118091.
5. LEE, Zachary, et al. Mixed-integer model predictive control of variable-speed heat pumps. *Energy and Buildings*, 2019, vol. 198, p. 75-83.
6. SALA-LIZARRAGA, Jose M.; PICALLO PEREZ, Ana. *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*. Butterworth-Heinemann, 2019.
7. BEJAN, Adrian; MAMUT, Eden (ed.). *Thermodynamic optimization of complex energy systems*. Springer Science & Business Media, 1999.
8. STANEK, Wojciech (ed.). *Thermodynamics for sustainable management of natural resources*. Springer, 2017.
9. GONZÁLEZ ELIZONDO, Martha, et al. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia uanl*, 2003, vol. 6, no 3.
10. RAUER, Denise, et al. Ragweed plants grown under elevated CO₂ levels produce pollen which elicit stronger allergic lung inflammation. *Allergy*, 2021, vol. 76, no 6, p. 1718-1730.
11. BIENVENIDO-HUERTAS, David. Do unemployment benefits and economic aids to pay electricity bills remove the energy poverty risk of Spanish family units during lockdown? A study of COVID-19-induced lockdown. *Energy Policy*, 2021, vol. 150, p. 112117.
12. POMIANOWSKI, Michal Zbigniew, et al. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 128, p. 109900.
13. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. DIRECTORATE OF SUSTAINABLE ENERGY POLICY. *Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050*. Organization for Economic, 2013.



14. CARPIO, Manuel; ZAMORANO, Montserrat; COSTA, Mário. Impact of using biomass boilers on the energy rating and CO₂ emissions of Iberian Peninsula residential buildings. *Energy and buildings*, 2013, vol. 66, p. 732-744.
15. ECHAVARRIA PASCUAL, Javier. Estudio de climatización VRF para rehabilitación de edificio en residencia de mayores en Burgos. 2019. Tesis de Licenciatura.
16. GUITIÁN RODRÍGUEZ, Alberto, et al. Proyecto de fontanería, ventilación, calefacción, saneamiento y agua caliente sanitaria para la rehabilitación de un edificio de 12 viviendas en Llanes. 2019.
17. TROI, Laura y col. Rehabilitación de los espacios de servicios públicos y sala de calderas- Teatro Real Monnaie. *Revista Romana de Ingeniería Civil*, 2019, vol. 10, no 3, pág. 320-326.
18. VARAS-MURIEL, María J .; FUERTE, Rafael; GÓMEZ-HERAS, Miguel. Evaluación de un sistema de suelo radiante en una capilla restaurada: Equilibrio entre el confort térmico y la conservación del patrimonio histórico. *Energía y Edificación*, 2021, vol. 251, pág. 111361.
19. ELENA, Stan Ivan Felicia; CRISTIAN, Dinu Radu. Análisis económico y financiero de soluciones de rehabilitación para una institución educativa. En 2019 Congreso Internacional de Sistemas Electromecánicos y Energéticos (SIELMEN) . IEEE, 2019. pág. 1-6.
20. ȚURCANU, Florin-Emilian, et al. Modelización del clima interior y análisis económico de la rehabilitación energética de una iglesia. *Energías*, 2020, vol. 13, no 11, pág. 2815.
21. MARTINAITIS, Vytautas, et al. A comparative thermodynamic analysis of air handling units at variable reference temperature. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 143, p. 385-395.
22. SHANAZARI, Ebrahim; KALBASI, Rasool. Improving performance of an inverted absorber multi-effect solar still by applying exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 143, p. 1-10.
23. YARI, Meysam; KALBASI, Rasool; TALEBIZADEHSARDARI, Pouyan. Energetic-exergetic analysis of an air handling unit to reduce energy consumption by a novel creative idea. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2019.
24. KALBASI, Rasool; SHAHSAVAR, Amin; AFRAND, Masoud. Incorporación de nuevas unidades de recuperación de calor en una UTA para análisis de exergía y reducción de la demanda de energía. *Revista de análisis térmico y calorimetría*, 2020, vol. 139, no 4, pág. 2821-2830.
25. MEGGERS, Forrest, et al. The Thermoheliodome–“Air conditioning” without conditioning the air, using radiant cooling and indirect evaporation. *Energy and Buildings*, 2017, vol. 157, p. 11-19.
26. CHEN, Lingen, et al. Exergy-based ecological optimization for a four-temperature-level absorption heat pump with heat resistance, heat leakage and internal irreversibility. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 129, p. 855-861.



27. HU, Pingfang, et al. Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies. *Energy and Buildings*, 2017, vol. 152, p. 301-312.
28. SAYADI, Saeed; TSATSARONIS, George; MOROSUK, Tatiana. Dynamic exergetic assessment of heating and cooling systems in a complex building. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 183, p. 561-576.
29. CALISKAN, Hakan; LEE, Dae-Young; HONG, Hiki. Enhanced thermodynamic assessments of the novel desiccant air cooling system for sustainable energy future. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 211, p. 213-221.
30. SAYADI, Saeed, et al. Exergy-based control strategies for the efficient operation of building energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 241, p. 118277.
31. RAZMARA, Meysam, et al. Optimal exergy control of building HVAC system. *Applied energy*, 2015, vol. 156, p. 555-565.
32. REDDY, Chethan R., et al. Optimal exergy-wise predictive control for a combined MicroCSP and HVAC system in a building. En 2019 American Control Conference (ACC). IEEE, 2019. p. 235-240.
33. TRINKLEIN, Eddy H.; PARKER, Gordon G.; MCCOY, Timothy J. Modeling, optimization, and control of ship energy systems using exergy methods. *Energy*, 2020, vol. 191, p. 116542.
34. AKBULUT, Ugur; UTLU, Zafer; KINCAY, Olcay. Exergy, exergoenvironmental and exergoeconomic evaluation of a heat pump-integrated wall heating system. *Energy*, 2016, vol. 107, p. 502-522.
35. MARCELINO, Inés IG; LANZINHA, Joao CG. Propuestas de Inspección Técnica e Intervención para la Rehabilitación de un Edificio de Viviendas Plurifamiliares de la década de los 60 del siglo pasado en Portugal. En IOP Conference Series: Ciencia e Ingeniería de Materiales. IOP Publishing, 2019. p. 092020.
36. CALERO, Mónica, et al. Propuestas de reducción de consumo de energía para sistemas térmicos en edificios residenciales. *Energía y edificación*, 2018, vol. 175, pág. 121-130.
37. MURGUÍA VALLEJO, Andrea. Rehabilitación de las instalaciones térmicas de una vivienda unifamiliar. 2018.
38. TARIFALUZHORA. (2022, 10 mayo). *Tarifaluzhora*. Tarifaluzhora. Recuperado 11 de mayo de 2022, de <https://tarifaluzhora.es/>
39. Selectra (2022, 10 mayo). *PRECIO GAS*. Precio gas. Recuperado 11 de mayo de 2022, de <https://preciogas.com/faq/precio-kwh>
40. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (2016, 11 enero). PVGIS TOOL. Recuperado 20 de mayo de 2022, de <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvgtools/en/>



ANEXO I: CÓDIGOS Y ALGORITMOS

Este anexo va dirigido a la exposición del sistema de ecuaciones planteado para el cálculo de los costes exergéticos a través de la aplicación de las proposiciones de la termoeconomía. El software utilizado ha sido Engineering Equation Solver (EES).

ANEXO I:

11 CÁLCULOS RELACIONADOS CON LA TERMEOECONOMÍA (EES)

{MODELO TERMEOECONÓMICO}

{Exergías de flujo}

B[1]=3663,56/3600*1000
B[2]=573,85/3600 *1000
B[3]=966,48/3600*1000
B[4]=16331,43/3600*1000
B[5]=15364,95/3600*1000
B[6]=392,63/3600*1000
B[7]=16314,79/3600*1000
B[8]=16313,91/3600*1000
B[9]=0,87/3600*1000
B[10]=16313,91/3600*1000
B[11]=5007,24/3600*1000
B[12]=11306,67/3600*1000
B[13]=4191,32/3600*1000
B[14]=27801,19/3600*1000
B[15]=3365,20/3600*1000
B[16]=4489/3600*1000
B[17]=7856,02/3600*1000
B[18]=6619,93/3600*1000
B[19]=4226,13/3600*1000
B[20]=2393,8/3600*1000
B[21]=11535,88/3600*1000
B[22]=11535,88/3600*1000
B[23]=3629,89/3600*1000
B[24]=7905,99/3600*1000
B[25]=0,63/3600*1000
B[26]=7905,99/3600*1000
B[27]=64973,98/3600*1000
B[28]=23930,20/3600*1000
B[29]=16868,24/3600*1000
B[30]=7061,96/3600*1000
B[31]=1565,98/3600*1000
B[32]=8627,93/3600*1000
B[33]=7401,71/3600*1000
B[34]=662,15/3600*1000
B[35]=6739,57/3600*1000
B[36]=11306,67/3600*1000



B[37]=11305,41/3600*1000
B[38]=11305,36/3600*1000
B[39]=11305,36/3600*1000
B[40]=9019,27/3600*1000
B[41]=11305,41/3600*1000
B[42]=9019,27/3600*1000
B[43]=9018,2/3600*1000
B[44]=9018,01/3600*1000
B[45]=8625,38/3600*1000
B[46]=2286,09/3600*1000
B[47]=1985,07/3600*1000
B[48]=9296,08/3600*1000
B[49]=10121,4/3600*1000
B[50]=10110,22/3600*1000
B[51]=7704,35/3600*1000
B[52]=7703,11/3600*1000
B[53]=7311,01/3600*1000
B[54]=392,10/3600*1000
B[55]=825,32/3600*1000
B[56]=433,22/3600*1000
B[57]=3367,44/3600*1000
B[58]=3043,55/3600*1000
B[59]=324/3600*1000
B[60]=6913/3600*1000
B[61]=7236,76/3600*1000
B[62]=62829,13/3600*1000
B[63]=2405,86/3600*1000
B[64]=706,56/3600*1000
B[65]=3112,42/3600*1000
B[66]=2796,60/3600*1000
B[67]=169,64/3600*1000
B[68]=2626,96/3600*1000
B[69]=64957,02/3600*1000
B[70]=64953,61/3600*1000
B[71]=33096,85/3600*1000
B[72]=33556,55/3600*1000
B[73]=31856,75/3600*1000
B[74]=31856,75/3600*1000
B[75]=31856,75/3600*1000
B[76]=0,404/3600*1000
B[77]=2732,71/3600*1000
B[78]=29124,05/3600*1000
B[79]=29124,05/3600*1000
B[80]=29124,07/3600*1000
B[81]=62680,62/3600*1000
B[82]=62330,06/3600*1000
B[83]=756,6/3600*1000
B[84]=459,7/3600*1000
B[85]=11461,64/3600*1000
B[86]=23679,86/3600*1000
B[87]=23609,87/3600*1000
B[88]=24436/3600*1000
B[89]=24436,46/3600*1000
B[90]=12218,23/3600*1000
B[91]=12218,24/3600*1000



{COSTES EXERGÉTICOS}
{PROPOSICIÓN 2: RECURSOS EXTERNOS}
{CALDERA}
 $B|STAR[1]=B[1]$

{COGENERACIÓN}
 $B|STAR[27]=B[27]$

{PV}
 $B|STAR[62]=B[62]$

{HP}
 $B|STAR[58]=B[58]$

{Td}
 $B|STAR[16]=B[16]$

{Tc}
 $B|STAR[31]=B[31]$

{Hc}
 $B|STAR[64]=B[64]$

{PROPOSICIÓN 4: SI HAY MAS DE UN PRODUCTO, TIENEN EL MISMO COSTE UNITARIO}
{R1}
 $(B|STAR[9]/B[9])=(B|STAR[10]/B[10])$

{R2}
 $(B|STAR[11]/B[11])=(B|STAR[12]/B[12])$

{R3}
 $(B|STAR[15]/B[15])=(B|STAR[88]/B[88])$

{R4}
 $(B|STAR[20]/B[20])=(B|STAR[19]/B[19])$

{R5}
 $(B|STAR[23]/B[23])=(B|STAR[24]/B[24])$

{R6}
 $(B|STAR[25]/B[25])=(B|STAR[26]/B[26])$

{R7}
 $(B|STAR[29]/B[29])=(B|STAR[30]/B[30])$

{R8}
 $(B|STAR[34]/B[34])=(B|STAR[35]/B[35])$

{R9}
 $(B|STAR[45]/B[45])=(B|STAR[6]/B[6])$

{R10}
 $(B|STAR[41]/B[41])=(B|STAR[39]/B[39])$

{R11}
 $(B|STAR[46]/B[46])=(B|STAR[40]/B[40])$



{R12}

$$(B|STAR[51]/B[51])=(B|STAR[63]/B[63])$$

{R13}

$$(B|STAR[53]/B[53])=(B|STAR[54]/B[54])$$

{R14}

$$(B|STAR[60]/B[60])=(B|STAR[59]/B[59])$$

{R15}

$$(B|STAR[67]/B[67])=(B|STAR[68]/B[68])$$

{R16}

$$(B|STAR[71]/B[71])=(B|STAR[73]/B[73])$$

{R17}

$$(B|STAR[83]/B[83])=(B|STAR[72]/B[72])$$

{R18}

$$(B|STAR[90]/B[90])=(B|STAR[91]/B[91])$$

{R19}

$$(B|STAR[76]/B[76])=(B|STAR[75]/B[75])$$

{R20}

$$(B|STAR[77]/B[77])=(B|STAR[78]/B[78])$$

{PROPOSICIÓN 1}

{CALDERA}

$$B|STAR[1]-B|STAR[2]=0$$

{COGENERACIÓN}

$$B|STAR[27]-B|STAR[28]=0$$

{PV}

$$B|STAR[62]-B|STAR[61]=0$$

{HP}

$$B|STAR[57]-B|STAR[56]=0$$

{HX1}

$$B|STAR[11]-B|STAR[13]=0$$

{HX2}

$$B|STAR[46]-B|STAR[47]=0$$

{HX3}

$$B|STAR[83]-B|STAR[84]=0$$

{Td}

$$B|STAR[17]-B|STAR[18]=0$$

{Tc}

$$B|STAR[32]-B|STAR[33]=0$$

{Hc}

$$B|STAR[65]-B|STAR[66]=0$$



{M1}

B|STAR[4]-B|STAR[7]=0

{M2}

B|STAR[36]-B|STAR[37]=0

{M3}

B|STAR[42]-B|STAR[43]=0

{M4}

B|STAR[49]-B|STAR[50]=0

{M5}

B|STAR[81]-B|STAR[82]=0

{M6}

B|STAR[86]-B|STAR[87]=0

{M7}

B|STAR[79]-B|STAR[80]=0

{D1}

B|STAR[43]-B|STAR[44]=0

{D2}

B|STAR[7]-B|STAR[8]=0

{D3}

B|STAR[37]-B|STAR[38]=0

{D4}

B|STAR[51]-B|STAR[52]=0

{D5}

B|STAR[69]-B|STAR[70]=0

{D6}

B|STAR[88]-B|STAR[89]=0

{D7}

B|STAR[73]-B|STAR[74]=0

{R1}

B|STAR[8]-B|STAR[9]-B|STAR[10]=0

{R2}

B|STAR[10]-B|STAR[11]-B|STAR[12]=0

{R3}

B|STAR[14]-B|STAR[15]-B|STAR[88]=0

{R4}

B|STAR[18]-B|STAR[20]-B|STAR[19]=0

{R5}

B|STAR[22]-B|STAR[23]-B|STAR[24]=0



$$\{R6\}$$
$$B|STAR[24]-B|STAR[25]-B|STAR[26]=0$$

$$\{R7\}$$
$$B|STAR[28]-B|STAR[29]-B|STAR[30]=0$$

$$\{R8\}$$
$$B|STAR[33]-B|STAR[34]-B|STAR[35]=0$$

$$\{R9\}$$
$$B|STAR[44]-B|STAR[45]-B|STAR[6]=0$$

$$\{R10\}$$
$$B|STAR[38]-B|STAR[39]-B|STAR[41]=0$$

$$\{R11\}$$
$$B|STAR[39]-B|STAR[40]-B|STAR[46]=0$$

$$\{R12\}$$
$$B|STAR[50]-B|STAR[51]-B|STAR[63]=0$$

$$\{R13\}$$
$$B|STAR[52]-B|STAR[53]-B|STAR[54]=0$$

$$\{R14\}$$
$$B|STAR[61]-B|STAR[59]-B|STAR[60]=0$$

$$\{R15\}$$
$$B|STAR[66]-B|STAR[67]-B|STAR[68]=0$$

$$\{R16\}$$
$$B|STAR[70]-B|STAR[71]-B|STAR[73]=0$$

$$\{R17\}$$
$$B|STAR[71]-B|STAR[83]-B|STAR[72]=0$$

$$\{R18\}$$
$$B|STAR[89]-B|STAR[90]-B|STAR[91]=0$$

$$\{R19\}$$
$$B|STAR[74]-B|STAR[75]-B|STAR[76]=0$$

$$\{R20\}$$
$$B|STAR[75]-B|STAR[77]-B|STAR[78]=0$$

$$\{C1\}$$
$$B|STAR[2]+B|STAR[6]-B|STAR[3]=0$$

$$\{C2\}$$
$$B|STAR[3]+B|STAR[5]-B|STAR[4]=0$$

$$\{C3\}$$
$$B|STAR[12]+B|STAR[9]-B|STAR[36]=0$$

$$\{C4\}$$
$$B|STAR[13]+B|STAR[87]-B|STAR[14]=0$$



{C5}
B|STAR[15]+B|STAR[16]-B|STAR[17]=0

{C6}
B|STAR[20]+B|STAR[26]-B|STAR[21]=0

{C7}
B|STAR[21]+B|STAR[25]-B|STAR[22]=0

{C8}
B|STAR[30]+B|STAR[31]-B|STAR[32]=0

{C9}
B|STAR[35]+B|STAR[45]-B|STAR[5]=0

{C10}
B|STAR[41]+B|STAR[40]-B|STAR[42]=0

{C11}
B|STAR[47]+B|STAR[53]-B|STAR[48]=0

{C12}
B|STAR[48]+B|STAR[55]-B|STAR[49]=0

{C13}
B|STAR[64]+B|STAR[63]-B|STAR[65]=0

{C14}
B|STAR[84]+B|STAR[91]-B|STAR[85]=0

{C15}
B|STAR[85]+B|STAR[90]-B|STAR[86]=0

{C16}
B|STAR[59]+B|STAR[58]-B|STAR[57]=0

{C17}
B|STAR[56]+B|STAR[54]-B|STAR[55]=0

{C18}
B|STAR[82]+B|STAR[68]-B|STAR[69]=0

{C19}
B|STAR[72]+B|STAR[80]-B|STAR[81]=0

{C20}
B|STAR[78]+B|STAR[76]-B|STAR[79]=0

Duplicate i=1;91
k[i]=B|star[i]/B[i]
End



{COSTES EXERGOECONÓMICOS}

{Costes externos}

$$c_{\text{gas}}=14*1,04 \text{ {Ceuro/kWhe}}$$

$$c_{\text{elec}}=26,47 \text{ {Ceuro/kWhe}}$$

{CALDERA}

$$c[1]=k[1]*c_{\text{gas}}$$

$$c[2]=k[2]*c[1]$$

{COGENERACIÓN}

$$c[27]=k[27]*c_{\text{gas}}$$

$$c[28]=k[28]*c[27]$$

{PV}

$$c[58]=c_{\text{elec}}*k[58]$$

{BOMBA DE CALOR}

$$c[56]=k[61]*c[57]$$

{INTERCAMBIADOR 1}

$$B[11]*c[11]=B[13]*c[13]$$

{INTERCAMBIADOR 2}

$$B[46]*c[46]=B[47]*c[47]$$

{INTERCAMBIADOR 3}

$$B[83]*c[83]=B[84]*c[84]$$

{DEPÓSITO Tc}

$$c[33]=B[32]/B[33]*c[32]$$

{DEPÓSITO Td}

$$B[17]*c[17]=B[18]*c[18]$$

{DEPÓSITO Hc}

$$B[65]*c[65]=B[66]*c[66]$$

{CÁMARAS DE MEZCLADO Y DIVISIÓN}

{m1}

$$B[7]*c[7]=b[4]*c[4]$$

{d1}

$$B[44]*c[44]=B[43]*c[43]$$

{d2}

$$B[7]*c[7]=B[8]*c[8]$$

{m2}

$$B[37]*c[37]=B[36]*c[36]$$

{m3}

$$B[43]*c[43]=B[42]*c[42]$$

{d3}

$$B[38]*c[38]=B[37]*c[37]$$

{m4}

$$B[50]*c[50]=B[49]*c[49]$$



{d4}

$$B[52]*c[52]=B[51]*c[51]$$

{m5}

$$B[82]*c[82]=B[81]*c[81]$$

{d5}

$$B[70]*c[70]=B[69]*c[69]$$

{m6}

$$B[87]*c[87]=B[86]*c[86]$$

{d6}

$$B[89]*c[89]=B[88]*c[88]$$

{m7}

$$B[80]*c[80]=B[79]*c[79]$$

{d7}

$$B[74]*c[74]=B[73]*c[73]$$

{CÍRCULOS}

{c1}

$$B[2]*c[2]+B[6]*c[6]=B[3]*c[3]$$

{c2}

$$B[3]*c[3]+B[5]*c[5]=B[4]*c[4]$$

{c3}

$$B[9]*c[9]+B[12]*c[12]=B[36]*c[36]$$

{c4}

$$B[13]*c[13]+B[87]*c[87]=B[14]*c[14]$$

{c5}

$$B[15]*c[15]+B[16]*c[16]=B[17]*c[17]$$

$$c[16]=c[2]$$

{c6}

$$B[20]*c[20]+B[26]*c[26]=B[21]*c[21]$$

{c7}

$$B[21]*c[21]+B[25]*c[25]=B[22]*c[22]$$

{c8}

$$c[32]*B[32]=c[30]*b[30]+c[31]*B[31]$$

$$c[31]=c[28]$$

{c9}

$$B[35]*c[35]+B[45]*c[45]=B[5]*c[5]$$

{c10}

$$B[41]*c[41]+B[40]*c[40]=B[42]*c[42]$$

{c11}

$$B[47]*c[47]+B[53]*c[53]=B[48]*c[48]$$



{c12}

$$B[48]*c[48]+B[55]*c[55]=B[49]*c[49]$$

{c13}

$$B[63]*c[63]+B[64]*c[64]=B[65]*c[65]$$

$$c[64]=c[28]$$

{c14}

$$B[84]*c[84]+B[91]*c[91]=B[85]*c[85]$$

{c15}

$$B[85]*c[85]+B[90]*c[90]=B[86]*c[86]$$

{c16}

$$c[57]=c[58]$$

{c17}

$$c[56]*B[56]+c[54]*B[54]=c[55]*B[55]$$

{c18}

$$B[82]*c[82]+B[68]*c[68]=B[69]*c[69]$$

{c19}

$$B[80]*c[80]+B[72]*c[72]=B[81]*c[81]$$

{c20}

$$B[78]*c[78]+B[76]*c[76]=B[79]*c[79]$$

{R1}

$$c[8]*B[8]=(B[9]+B[10])*c[9]$$

$$c[9]=c[10]$$

{R2}

$$c[10]*B[10]=(B[11]+B[12])*c[11]$$

$$c[11]=c[12]$$

{R3}

$$c[14]*B[14]=(B[15]+B[88])*c[15]$$

$$c[15]=c[88]$$

{R4}

$$c[18]*B[18]=(B[20]+B[19])*c[20]$$

$$c[19]=c[20]$$

{R5}

$$c[22]*B[22]=(B[23]+B[24])*c[23]$$

$$c[23]=c[24]$$

{R6}

$$c[24]*B[24]=(B[25]+B[26])*c[25]$$

$$c[25]=c[26]$$

{R7}

$$c[28]*B[28]=(B[29]+B[30])*c[29]$$

$$c[29]=c[30]$$



{R8}

$$c[33]*B[33]=(B[34]+B[35])*c[34]$$
$$c[34]=c[35]$$

{R9}

$$c[44]*B[44]=(B[45]+B[6])*c[45]$$
$$c[6]=c[45]$$

{R10}

$$c[38]*B[38]=(B[39]+B[41])*c[39]$$
$$c[39]=c[41]$$

{R11}

$$c[39]*B[39]=(B[40]+B[46])*c[40]$$
$$c[46]=c[40]$$

{R12}

$$c[50]*B[50]=(B[63]+B[51])*c[63]$$
$$c[63]=c[51]$$

{R13}

$$c[52]*B[52]=(B[53]+B[54])*c[53]$$
$$c[53]=c[54]$$

{R15}

$$c[66]*B[66]=(B[67]+B[68])*c[67]$$
$$c[68]=c[67]$$

{R16}

$$c[70]*B[70]=(B[71]+B[73])*c[71]$$
$$c[73]=c[71]$$

{R17}

$$c[71]*B[71]=(B[83]+B[72])*c[83]$$
$$c[72]=c[83]$$

{R18}

$$c[89]*B[89]=(B[90]+B[91])*c[90]$$
$$c[91]=c[90]$$

{R19}

$$c[74]*B[74]=(B[75]+B[76])*c[75]$$
$$c[75]=c[76]$$

{R20}

$$c[75]*B[75]=(B[77]+B[78])*c[78]$$
$$c[77]=c[78]$$

ANEXO II: METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se recogen todas las tareas que se han ido realizando para concluir con el proyecto, tales como; reuniones, visitas, fases, ... del proyecto, que consta de 423 horas.

12 DESCRIPCIÓN DE TAREAS, FASES, EQUIPOS O PROCEDIMIENTOS

El proyecto se ha dividido en 10 tareas tal y como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Tareas realizadas

| | |
|----------------|---|
| Tarea 0 | Coordinación y gestión del trabajo |
| Tarea 1 | Búsqueda de referencias bibliográficas |
| 1,1 | Diseño de la estructura del TFM |
| 1,2 | Clasificar referencias en función del estudio que realizan (Termoeconomía, eficiencia, control, exergía, ...) |
| 1,3 | Redacción del estado del arte |
| Tarea 2 | Visita a la instalación |
| 2,1 | Visualizado de los equipos principales |
| 2,2 | Visualizado del sistema de control y distribución |
| Tarea 3 | Programación del modelo TRANSYS |
| 3,1 | Replicar instalación en Trnsys |
| 3,2 | Simular instalación |
| 3,3 | Obtención de datos por cada punto de temperaturas y flujos másicos |
| Tarea 4 | Realizar balances de energía y exergía |
| 4,1 | Obtención de consumos, rendimientos energéticos y eficiencias exergéticas por equipos |
| Tarea 5 | Estudio termoeconómico |
| 5,1 | Redactar EES para la aplicación de las proposiciones de la termoeconomía |
| 5,2 | Calcula y añadir resultados del análisis termoeconómico en la memoria |
| Tarea 6 | Comparar funcionamiento de la instalación en distintas localidades |
| 6,1 | Elegir localidades y calcular nuevas demandas de calefacción para cada una de ellas |
| 6,2 | Realizar el procedimiento desde la tarea 4 con ambas localidades |
| Tarea 7 | Redactar correctamente el documento de memoria del TFM |
| Tarea 8 | Redacción de conclusiones y anexos |
| 8,1 | Discusión de los resultados y redacción de conclusiones |
| 8,2 | Redacción de anexos |
| Tarea 9 | Presentación oral del TFM y ensayos para la defensa |

Para concluir con este apartado, la **Tabla 41** muestra las horas empleadas a las reuniones grupales de los redactores del documento, en las tareas y las horas totales del proyecto.

Tabla 41. Recuento de horas por tarea, reunión y totales

| TAREA | INICIO [h] | DURACIÓN [h] | FINAL [h] |
|---------|------------|--------------|-----------|
| Tarea 0 | 0 | 415 | 415 |
| Tarea 1 | 0 | 60 | 60 |
| 1,1 | 0 | 30 | 30 |
| 1,2 | 30 | 15 | 45 |
| 1,3 | 45 | 15 | 60 |
| Tarea 2 | 60 | 5 | 65 |
| 2,1 | 60 | 2,5 | 62,5 |
| 2,2 | 62,5 | 2,5 | 65 |
| Tarea 3 | 65 | 24 | 89 |
| 3,1 | 65 | 20 | 85 |
| 3,2 | 85 | 3 | 88 |
| 3,3 | 88 | 1 | 89 |
| Tarea 4 | 89 | 25 | 114 |
| 4,1 | 89 | 25 | 114 |
| Tarea 5 | 114 | 25 | 139 |
| 5,1 | 114 | 15 | 129 |
| 5,2 | 129 | 10 | 139 |
| Tarea 6 | 139 | 51 | 190 |
| 6,1 | 139 | 1 | 140 |
| 6,2 | 140 | 50 | 190 |
| Tarea 7 | 65 | 325 | 390 |
| Tarea 8 | 190 | 18 | 208 |
| 8,1 | 190 | 8 | 198 |
| 8,2 | 198 | 10 | 208 |
| Tarea 9 | 390 | 25 | 415 |

| REUNIONES | DURACIÓN [h] |
|-----------|--------------|
| Tarea 1 | 1 |
| Tarea 2 | 1 |
| Tarea 3 | 1 |
| Tarea 4 | 1 |
| Tarea 5 | 1 |
| Tarea 6 | 1 |
| Tarea 7 | 1 |
| Tarea 8 | 1 |

| DURACIÓN TOTAL [h] | |
|-------------------------------|-----|
| Tareas | 415 |
| Reuniones | 8 |
| Proyecto (Tareas + Reuniones) | 423 |

13 DIAGRAMA DE GANTT/ CRONOGRAMA

El Gráfico 13 es el diagrama de Gantt correspondiente a las tareas realizadas. En este se reflejan las horas dedicadas a cada una de las tareas.

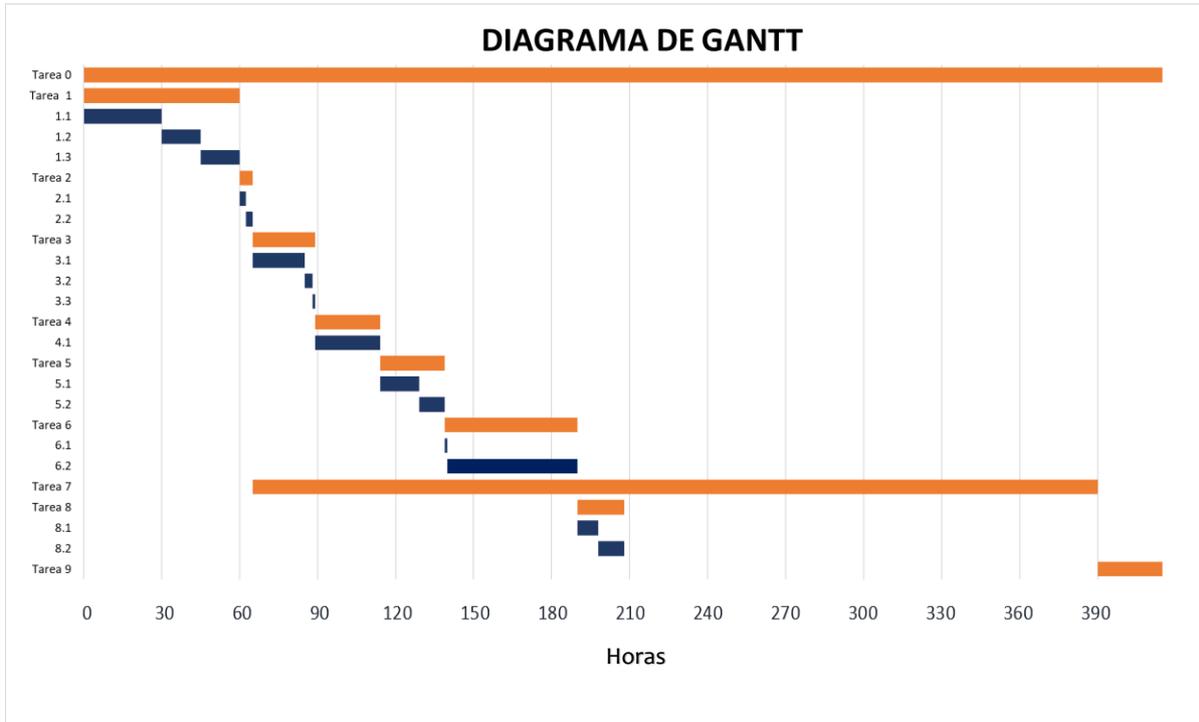


Gráfico 13. Diagrama de Gantt



ANEXO III: PRESUPUESTO

Este anexo recoge todos los recursos económicos necesarios para la contratación de los recursos humanos que han llevado a cabo el proyecto. Asimismo, se añade un apartado más para los gastos de locomoción, con el motivo de asistencia a reuniones, visitas, ...

14 CONTRATACIÓN DE RR.HH.

La Tabla 42 muestra el coste estimado por horas de cada una de las personas contratadas para realizar este proyecto.

Tabla 42. Gastos por RR.HH.

| RR.HH. | HORAS | COSTE $\left[\frac{\text{€}}{h} \right]$ | COSTE [€] |
|--------------|-------|--|---------------|
| DIRECTORA | 68,3 | 42 | 2868,6 |
| ALUMNO | 415 | 17 | 7055 |
| TOTAL | | | 9923,6 |

15 GASTOS DE LOCOMOCIÓN

A lo largo del proyecto, todas las reuniones fueron realizadas vía On-Line. Aun así, fueron necesarias 2 visitas a la instalación para poder trasladar todos los datos antes de simularlos. Todos los gastos relacionados con la movilidad se recogen en la Tabla 43 .

Tabla 43. Gastos de locomoción

| RR.HH. | Distancia [km] | COSTE $\left[\frac{\text{€}}{km} \right]$ | COSTE [€] |
|--------------|-------------------|---|--------------|
| DIRECTORA | 60 | 0,5 | 30 |
| ALUMNO | 62,8 | 0,5 | 31,4 |
| TOTAL | | | 62,4 |